

二氧化硫检测仪光源系统的优化设计

王桂梅, 李世超*

河北工程大学机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038

摘要 为了解决国内传统二氧化硫检测仪在光路上存在荧光数量少、采集精确度低等问题,提出了一种改进的光路系统。点光源通过透镜进行平行准直及会聚,利用窄缝减弱杂散光的干扰,改善了传统光路结构上光会聚效果差的缺陷,提升了检测精度。运用 Zemax 对新光路和传统光路进行仿真,通过对比点列图、探测视图得出新光路的方均根半径减小到 $35.439\ \mu\text{m}$,几何最大半径减小到 $50.194\ \mu\text{m}$,气体与光源接触区域的光强提高。对其进行实验检测,数据表明改进后的光路系统的二氧化硫浓度示值误差由传统仪器的 2% 缩减为 1%,提高了检测精度。新研制的光路系统能有效解决上述问题,适用于二氧化硫检测仪的设计。

关键词 光学设计; 紫外荧光法; Zemax; 窄缝

中图分类号 TH74 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.012205

Optimization Design of Light Source System for Sulfur Dioxide Detector

Wang Guimei, Li Shichao*

College of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China

Abstract This paper proposes an improved optical path system to solve two problems caused by domestic traditional sulfur dioxide detectors: less optical path fluorescence and low acquisition accuracy. The point light source is collimated and concentrated using a lens, and a narrow slit is used to reduce interference of stray light, thereby improving the defect of the light intensity convergence effect on the conventional optical path structure and improving the detection precision as well. Zemax is used to simulate the new and original light paths. By comparing the point map and detection view, the root-mean-square radius and geometric maximum radius of the new light path are reduced to $35.439\ \mu\text{m}$ and $50.194\ \mu\text{m}$, respectively, and the light intensity of the contact area between the gas and light source is improved. The experimental test shows that, compared with the conventional instrument, the sulfur dioxide concentration indication value error of the improved optical path system is reduced from 2% to 1%, improving detection accuracy. This newly developed optical path system can effectively solve above problems and is suitable for the design of sulfur dioxide detectors.

Key words optical design; ultraviolet fluorescence method; Zemax; narrow slit

OCIS codes 220.4830; 120.4570; 300.6540

1 引言

二氧化硫是大气污染物的主要成分之一,其含量是检测空气质量的标准之一。国外早在 20 世纪 70 年代初就开始进行二氧化硫检测技术的研究,荧光检测法在 1973 年首次由 Okade 提出,其后各国不断对其进行优化设计。目前,最新研发成果有以下几种:美国英思科公司研制的 ISC MX6 iBrid 型

二氧化硫检测仪,其测量范围为 $0\sim 150\times 10^{-6}$,分辨率为 0.1×10^{-6} ;日本 HORIBA 公司研制的 APSA-370 型二氧化硫浓度监测仪获得了极高的灵敏度,达到了检测下限 0.5×10^{-9} ;美国 Thermo 公司研制的 43i 型二氧化硫分析仪,采用脉冲荧光技术测量空气中的二氧化硫,利用反射带通滤光片的光化学降级,提高了光选择性。这些装置均可解决现场连续监测的问题,但大部分高精度仪器均为国

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-06-01; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 河北工程大学与中节能天融科技有限公司校企合作项目

* E-mail: 1486642604@qq.com

外设备,其价格昂贵、不便于维护管理,未能实现大规模使用。我国目前只有少部分城市采用紫外荧光法检测仪器,且由于技术上的差距,这种紫外荧光法检测仪器存在稳定性差、检测精确度低等问题。北京怡孚和融科技公司的二氧化硫分析仪、雪迪龙 T1100 型二氧化硫分析仪等国内仪器在精度、量程等方面与世界先进水平仍有差距。因此,一种检测精度高、稳定性强的二氧化硫监测仪成为我国环保领域的主要研究内容之一^[1-6]。

对于上述问题,本文提出一种新的激发光光学系统。光源采用 214 nm 波段的氙灯。由于传统光路利用平凸透镜对点光源进行准直,光路存在光强弱、杂散光干扰的问题,故本研究在平凸透镜后添加双凸透镜,利用双凸透镜将准直后的光线会聚于一点,并在双凸透镜前放置窄缝,以保证气室入射光线角度可控,防止杂散光对荧光采集的干扰。最后运用 Zemax 进行了仿真验证。

2 多种检测光路结构分析

传统的国内二氧化硫检测设备结构之一如图 1 所示,光源光通过滤光片转换为 214 nm 的紫外光,经平凸透镜平行准直后光照射在检测气体上,二氧化硫分子与紫外光发生反应后产生荧光,荧光光子经过采集部分的透镜后入射到光电倍增管(PMT)。将光电倍增管检测的荧光强度数据以及光源照射气体后打入到光探测器的强度数据上传到数据库,再进行上位机处理,得出二氧化硫浓度值。但是,此种光路结构是将点光源进行平行准直,光线没有会聚导致光的能量减弱,荧光强度低,检测精度下降。

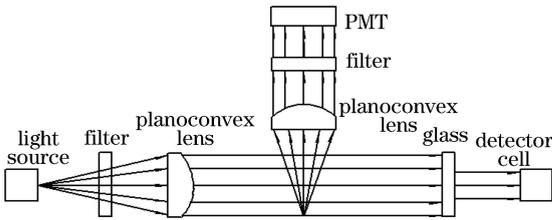


图 1 单气室结构图

Fig. 1 Single air chamber structure

另一种光路结构如图 2 所示,将光源进行会聚后投射到分光板上,分别入射到测量室与参比室,利用光电倍增管检测信号,将两种信号处理后经过数据对比弥补误差,检测准确度有所提升。该结构虽然利用参比气室的对比提升了检测精度,但是会聚后的光线经过分光板分化后,光强下降,检测精度提升有限。同时,参比气室的存在使得监测仪器体积

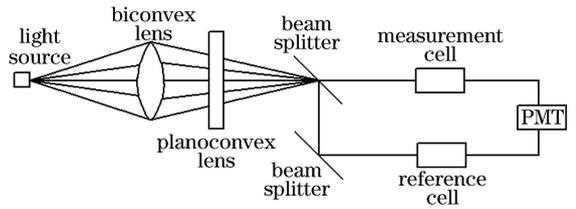


图 2 双气室结构图

Fig. 2 Double air chamber structure

大,无法做到便携式。

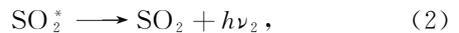
目前,市场上国外仪器采用平行会聚的光学结构,相较于国内仪器,其双凸透镜将光线会聚,可在反应区域内得到更高的光强。同时,在气室前方设有遮光孔,可以防止杂散光进入气室干扰检测,无需参比气室即可得到较为精确的浓度值,缩减了气室体积。

综上所述,为了得到更加精确的浓度值,需要光电倍增管采集到足够强度的荧光。而荧光强度与荧光数量和采集部分的透镜聚焦有关,决定强度的基础在于荧光产生的数量,而数量又与光源照射下检测气体的反应程度有关。故为了产生足够多的荧光光子,需要对激发光路进行设计,以保证照射在检测气体的光的强度足够高^[7-10]。

3 激发光强与荧光强度的关系

测量二氧化硫的主要方法为紫外荧光法,通过紫外光对二氧化硫气体进行照射产生荧光,将光电倍增管检测到的荧光强度传输到数据库,计算二氧化硫浓度。其成本低,精确度高,可测量更低浓度的二氧化硫,同时实现实时监测、连续监测。

二氧化硫分子对各个波段的紫外线吸收效果不同,对 190~230 nm 波长范围内的紫外线吸收最强。二氧化硫分子受激发光会产生不同能级的跃迁,首先是分子受激发跃迁到激发态,处于激发态的二氧化硫分子返回基态的瞬间产生荧光^[11-15]。其过程为



式中: $h\nu_1$ 、 $h\nu_2$ 表示二氧化硫吸收的量子能; SO_2^* 表示吸收紫外光跃迁后的二氧化硫分子。显然,样品气体中二氧化硫的浓度越高,在紫外光的照射下产生的荧光数量越多。根据朗伯-比尔定律,紫外光被二氧化硫分子吸收的强度可表示为

$$I_a = I_0 - I_b = I_0 - I_0 \exp(-\alpha Lc), \quad (3)$$

式中: I_0 为光的入射强度; α 表示二氧化硫分子对紫外光的吸收系数; L 代表光程; c 为二氧化硫气体的浓度; I_a 为二氧化硫分子的吸收强度, I_b 为经过二

氧化硫分子吸收后的光的强度。那么荧光强度可表示为

$$I_c = GQI_b = GQI_0 \exp(-\alpha Lc), \quad (4)$$

式中: I_c 为荧光强度; G 为光反应腔体的几何系数; Q 表示荧光量子效率。

由(4)式可知, 荧光强度与入射光的强度成正比关系, 当浓度确定时, 其余系数为常量, 增强反应区域入射光的强度, 有利于增加荧光光子数量, 光电倍增管采集到的荧光能量增加, 检测精度提高。因此, 光源系统中提高反应区域的激发光强度对于提高检测精度, 以及检测低浓度的二氧化硫有着重要意义^[16]。

4 光源系统设计及优化

针对上述两种结构的缺陷, 为了保证光源照射

表1 光源系统透镜数据表

Table 1 Data sheet of lenses in light source system

Surface type	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Material	Half diameter /mm
Standard surface 0	0,000	0,000	—	0,000
Standard surface 1	0,000	25,000	—	12,700
Standard surface 2	20,000	9,600	Silica	12,700
Standard surface 3	0,000	10,000	—	12,700
Standard surface 4	20,000	10,260	Silica	12,700
Standard surface 5	-20,000	25,000	—	12,700

根据以上数据进行模型建立, 结构如图3所示。采用214 nm波段光源, 透镜均选择石英玻璃材质, 运用Zemax仿真得到点列图, 如图4所示。从图3中可以观察到点光源经过平凸透镜后近似以平行光射出, 再经过双凸透镜会聚于投射面, 此时该系统实现最优的会聚效果。由图4可见, 光源集中在中心位置, 其方均根半径(RMS)为8630.76 μm , 几何最大半径(GEO)为27473.56 μm 。其中方均根半径可以表示光能的集中程度, 几何最大半径则反映像差的最大值, 是判断成像质量好坏的依据。

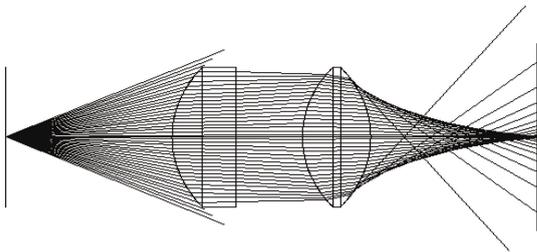


图3 光路3D外形图

Fig. 3 3D layout of light path

虽然, 上述光路达到了光源会聚的效果, 但是从光路图以及点列图中可发现该光路系统的球差较

时二氧化硫分子充分反应, 得到较多的荧光光子, 本文设计了一种由平凸透镜进行平行准直、双凸透镜会聚光线的光路系统, 其设计数据如表1所示。运用紫外荧光法检测二氧化硫气体时, 由于大气中二氧化硫的浓度较低, 在紫外光的照射下产生的荧光光子数较少, 荧光信号容易被噪声淹没, 影响测量精度; 且紫外光最强波段是在330 nm, 但是其强度是二氧化硫衰减产生的荧光强度的5倍, 这会导致荧光被淹没, 而二氧化硫分子对190~230 nm波长范围内的紫外线吸收最强。因此采用214 nm波段进行气体照射, 可有效避免荧光采集的光源干扰, 同时二氧化硫对于紫外光的吸收达到最强, 提高了采集精确度。光源滤光后, 利用平凸透镜将发散光转变为能量集中、光束方向性好的平行光, 光线再经过双凸透镜会聚, 从而使反应区域的光强达到最强^[17-18]。

RMS: 8630.76 μm
GEO: 27473.56 μm

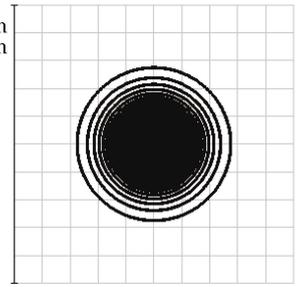


图4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

大, 部分光线在会聚点前提前会聚, 达不到较好的成像质量。同时, 部分光线以60°及更大角度进入气室, 这会导致部分光源投射到采集区域的透镜, 造成采集的荧光中含有其他杂散光, 影响测量精度。为了解决上述问题, 进行光路优化设计, 其设计数据如表2所示, 在平凸透镜与双凸透镜之间加入窄缝, 只允许部分光源通过双凸透镜投射到会聚面, 有效防止杂散光的入射, 解决上述系统的缺陷, 光路结构如图5所示。

由图5可知, 改进后的光源系统中光路设计更加合理, 会聚效果更加完美, 避免了光线在会聚面前

表2 改进后光源透镜数据表

Table 2 Data sheet of improved light source lenses

Surface type	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Material	Half diameter /mm
Standard surface 0	0.000	0.000	—	0.000
Standard surface 1	0.000	25.000	—	12.700
Standard surface 2	20.000	9.600	Silica	12.700
Standard surface 3	0.000	10.000	—	12.700
Standard surface 4	0.000	1.000	Absorb	12.700
Standard surface 5	0.000	10.000	—	12.700
Standard surface 6	20.000	10.260	Silica	12.700
Standard surface 7	-20.000	25.000	—	12.700

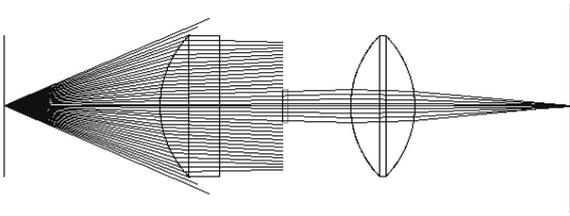


图5 优化后光路3D外形图

Fig. 5 Optimized 3D layout of optical path

方区域提前会聚的现象,观察图6,发现方均根半径减小到 $35.439 \mu\text{m}$, 几何最大半径减小到 $50.194 \mu\text{m}$, 弥散斑直径大大减小, 球差较小, 光源成像质量提高。同时, 优化后的光路可以确保光线在进入气室中以小角度扩散。本设计中光线以 15° 进入气室, 有效降低了光线在进入气室后部分光扩散到采集透镜的可能性, 减少了光源对采集荧光的干扰, 提高了采集精度。

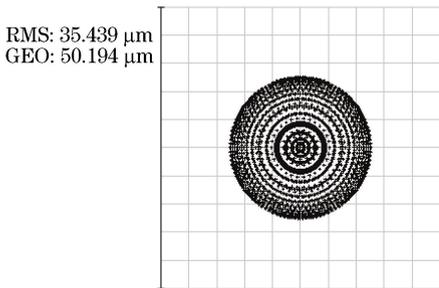


图6 优化后点列图

Fig. 6 Optimized spot diagram

确保光路的合理性后, 建立传统单气室光路、双气室光路和新光路的三维模型, 进行 Zemax 非序列模式仿真, 验证实体光路投射效果。采用相同能量的光源, 探测器分辨率为 $2048 \text{ ppi} \times 2048 \text{ ppi}$ (ppi 即每英寸所拥有的像素数), 结构布局如图1与图5所示。结果如图7、图8和图9所示, 在传统单气室光路中, 其辐照度峰值强度最高只有 0.2821 W/cm^2 , 双气室光路为

17.2217 W/cm^2 , 改进后的新系统光中辐照度峰值强度达到 21.1374 W/cm^2 , 光强的提高有利于产生更多的荧光光子, 光电倍增管检测到的荧光信号强度增加, 检测精度更高。

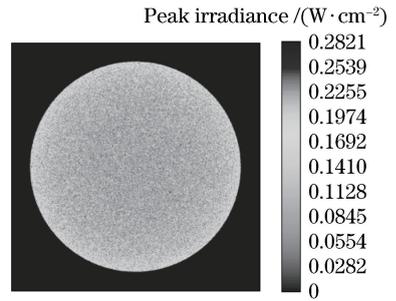


图7 单气室结构探测视图

Fig. 7 Detection view of single air chamber structure

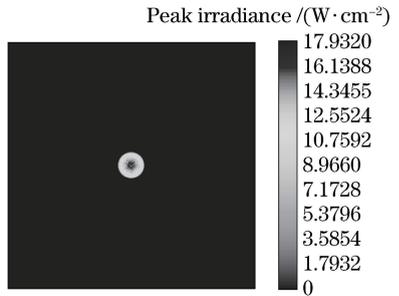


图8 双气室结构探测视图

Fig. 8 Detection view of double air chamber structure

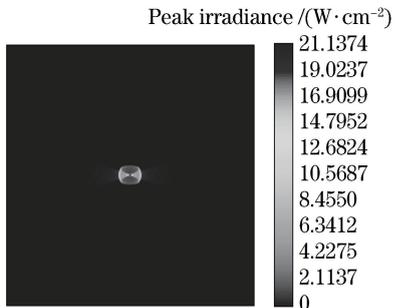


图9 新系统光路探测视图

Fig. 9 Detection view of optical path of new system

5 实 验

基于以上仿真分析可知,传统仪器中双气室结构的光路远优于单气室结构,故在双气室仪器的基础上,重新设计气室光源结构,观测二氧化硫浓度值,比较双气室光路系统与新光路系统的检测效果。结合新的光路系统重建模型,气室、进气口和出气口等关键部位与传统结构保持一致,荧光采集部分结构保持不变,如图 10 所示。对新结构气密性以及透光性进行检测,均达到良好状态。将新设备搭建到原有系统中,分别对三种浓度的二氧化硫进行检测,得出检测数据。

如表3数据所示,对于传统双气室光路,其示值

表 3 相同二氧化硫浓度测试对比数据

Table 3 Comparison of data obtained by tests with the same sulfur dioxide concentration

Sulfur dioxide concentration / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Traditional optical path		Improve system	
	Sulfur dioxide detection concentration / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Error value / %	Sulfur dioxide detection concentration / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Error value / %
1.523	1.493	1.97	1.512	0.72
	1.498	1.64	1.506	1.12
	1.495	1.83	1.509	0.92
15.386	15.091	1.92	15.254	0.86
	15.135	1.63	15.238	0.96
	15.129	1.67	15.244	0.92
50.981	50.103	1.72	50.532	0.88
	49.982	1.96	50.561	0.82
	49.993	1.94	50.623	0.70

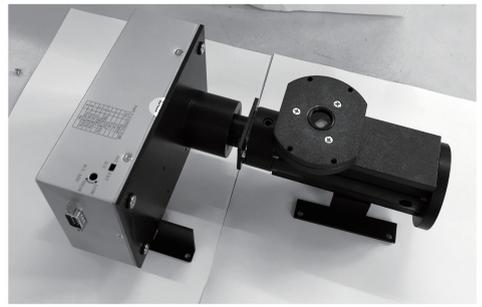


图 10 气室结构

Fig. 10 Gas chamber structure

误差约为 2%,采用改进后的光路系统,示值误差缩减到 1%。实验结果表明:改进后的光路系统检测精度明显优于传统光路,检测精确度大幅度提升。

6 结 论

新的光路系统依据紫外荧光法对传统光路的光源部分进行光路设计并优化,从 Zemax 仿真结果可以看到,优化后的光路弥散斑几何直径小,成像质量好。新光路系统的光强是传统单气室光学系统强度的 75 倍,双气室结构的 1.18 倍。光强的提升利于提高二氧化硫转变成荧光光子的概率。同时,窄缝使得光线只能在水平方向扩散,垂直方向散射较小,避免了光线在进入气室后对荧光采集的干扰。搭建实验系统并对二氧化硫气体分子浓度进行检测发现,示值误差由 2% 提高到 1%,间接证明了新光路系统提高了光源的会聚效果,促使光与二氧化硫气体分子反应更加充分,从而增加了荧光的光子数量,使得光电倍增管检测到的荧光信号增多,提高了检测精确度。

参 考 文 献

[1] Kang J. Fluorescent UV method SO_2 concentration

detector design [D]. Baoding: Hebei University, 2012.

康健. 紫外荧光法二氧化硫浓度检测仪设计[D]. 保定: 河北大学, 2012.

[2] Zheng D Z, Liu M, Zhao J. Detector for the concentration of sulfur dioxide based on ultraviolet fluorescence method[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(3): 497-501.

郑德忠, 刘明, 赵静. 紫外荧光测二氧化硫浓度系统研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(3): 497-501.

[3] Zhang X B. Study on sulfur dioxide concentration measurement based on fluorescence method [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2001.

张晓彬. 基于荧光法测量二氧化硫浓度的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.

[4] Jian X. Research on sulfur dioxide concentration based on fluorescent technology [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.

监雄. 基于荧光技术检测二氧化硫浓度的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

- [5] Hanulia T, Inami W, Ono A, et al. Fluorescence lifetime measurement excited with ultraviolet surface plasmon resonance [J]. Optics Communications, 2018, 427: 266-270.
- [6] Matsumi Y, Shigemori H, Takahashi K. Laser-induced fluorescence instrument for measuring atmospheric SO₂ [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(17): 3177-3185.
- [7] Du W, He Z J, Han P. Filter optimization of UV fluorescence sulfur dioxide analyzer [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(4): 702-705.
杜伟, 何振江, 韩鹏. 紫外荧光二氧化硫分析仪中滤光器的优化[J]. 半导体光电, 2013, 34(4): 702-705.
- [8] Wang S T, Wang Z F, Liu M H, et al. Study of the detecting system of CH₄ and SO₂ based on spectral absorption method and UV fluorescence method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(1): 287-291.
王书涛, 王志芳, 刘铭华, 等. 基于光谱吸收法和荧光法的甲烷和二氧化硫检测系统的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 287-291.
- [9] Zhang Z M. Research on sulfur dioxide optical measurement techniques[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
张志明. 二氧化硫光学测量技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2011.
- [10] Wang L. Absorption spectroscopic methods for monitoring both sulfur dioxide and carbon disulfide [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
王琳. 二氧化硫和二硫化碳气体测量的吸收光谱方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] Xu M J. Design of sulfur dioxide concentration detector [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
徐孟娟. SO₂浓度检测仪的设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [12] Li J, Cheng S. Optimization of sulfur dioxide concentration detection in air based on mixed model [J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2018, 27(4): 43-46.
李静, 程适. 基于混合模型的空气中二氧化硫浓度检测优化[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2018, 27(4): 43-46.
- [13] Li Q K, Huang Y K, Li Z Q, et al. The detection method research of nitrogen oxides and sulfur dioxide generated from burning incense with ion chromatography [J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(21): 98-99, 109.
黎强科, 黄雨锴, 李振球, 等. 离子色谱法测定燃香燃烧后氮氧化物和二氧化硫的检测方法研究[J]. 山东化工, 2018, 47(21): 98-99, 109.
- [14] Huang B. Research on detection limit of sulfur dioxide based on ultraviolet fluorescence method[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016.
黄彪. 基于紫外荧光法二氧化硫检出限的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [15] Wang T, Gao W F, Liang J J, et al. Study on atmospheric SO₂ detection method [J]. Technology Innovation and Application, 2015(30): 145-146.
王婷, 高伟峰, 梁姬君, 等. 大气 SO₂ 检测方法研究[J]. 科技创新与应用, 2015(30): 145-146.
- [16] Sui C H, Wo S J, Xu D Y, et al. Design and implementation of illumination system for slit-lamp microscope [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 112202.
隋成华, 沃圣杰, 徐丹阳, 等. 裂隙灯显微镜照明系统的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 112202.
- [17] Yang F, He C, Zhang X S. Design and analysis of a primary-secondary system for LED collimating illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082201.
杨帆, 何川, 张旭升. 一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082201.
- [18] Wu T, Su Z P. Design of free-form lens for extended LED source based on weighted overlap algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 122202.
吴涛, 苏宙平. 基于加权叠加法的扩展 LED 光源自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 122202.