

doi:10.3788/gzxb20154403.0312003

无限远微光瞄具目标模拟发生装置研究

肖作江^{1a}, 郭晓雪^{1b}, 朱海滨², 徐志刚², 安志勇^{1b}

(1 长春理工大学 a. 生命科学技术学院; b. 光电工程学院, 长春 130022)

(2 吉林东光精密机械厂, 长春 130022)

摘 要:根据射手夜间瞄准射击时实际夜天光环境下景物反射的光照度值,计算出进入微光瞄准镜入瞳处的光照度值,以此照度值设计了双积分球照明模式的无限远微光瞄具目标模拟发生装置.根据积分球原理在双积分球之间设置有可变光阑,根据检测系统要求为微光夜视仪提供了四档可切换的微光照度环境.为保证在实验检测过程中待测瞄具能接收到光源出射的最大光照度,分析了待测瞄具距离平行光管的实际安装位置,得出影响待测瞄具入瞳处光照度值的三个关键因素为大小积分球之间可变光阑的口径、平行光管的视场及被测瞄具距离平行光管物镜的安装位置.最后,对积分球出射窗口处光照度,以及经过无限远目标模拟发生装置后出射的光照度值进行分析计算与实验测量,结果表明光照度不均匀度 $<2\%$,满足应用要求.

关键词:成像光学;微光夜视仪;积分球;可变光阑;平行光管;光应力;光照度;均匀性

中图分类号:O432; O439

文献标识码:A

文章编号:1004-421(2015)03-0312003-6

Research on Generating Device of Infinite Low Light Level Weapon Sight Target Simulation

XIAO Zuo-jiang^{1a}, GUO Xiao-xue^{1b}, ZHU Hai-bin², XU Zhi-gang², AN Zhi-yong^{1b}

(1a. School of Life and Technology; b. School of Optoelectronic Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

(2 JiLin Dongguang Precision Machinery Factory, Changchun 130022, China)

Abstract: According to scene illumination under night sky radiation, when shooters were aiming and positioning at night, the illumination at the entrance pupil of the sight was calculated, and the generating device for infinite target simulation based on double-integrating-sphere in illumination-mode was designed in accordance with the illumination. Variable diaphragm applied to offer four switchable low light stress environments for the night vision device according to the principle of the integrating sphere, which was setting between the double-integrating-sphere. Meanwhile, for the sake of the maximum illumination could be received by the Low-Light-Level sight during the test, the installation position of the sight relative to collimator was analyzed. The results show that the three crucial factors which influenced the illumination at its entrance pupil are scilicet the clear aperture of the iris diaphragm setting between the double-integrating-sphere, the field of view of the collimator, and the installation position of the Low-Light-Level weapon sight apart from the collimator objective. Finally, the output illuminance of the integrating sphere and generating device were analyzed and calculated, the results of experiment and measuring showed that the illumination non-uniformity is $<2\%$, which can meet the application requirements.

Key words: Imaging optics; Low-light-level night vision system; Integrating sphere; Variable diaphragm;

基金项目:中国兵器集团公司北京某研究所项目(No. KYC-XZ-XM-2012-013)资助

第一作者:肖作江(1973-),男,副研究员,博士,主要研究方向为光电检测与精密仪器设计. Email:xiao2706@163.com

通讯作者:郭晓雪(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光电测控技术与仪器研究. Email:821956304@qq.com

导师:安志勇(1943-),男,教授,博导,主要研究方向为光电测控系统与仪器研究. Email:an_zhiyong@126.com

收稿日期:2014-07-11;录用日期:2014-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

Collimator; Light stress; Illumination; Uniformity

OCIS Codes: 120.1680; 220.0220; 110.2945; 150.2945

0 引言

微光瞄具主要用于夜间瞄准和观察,在士兵作战中发挥着不可替代的作用^[1],而瞄具的可靠性是其发挥作战效能的重要质量特性.为提高武器的环境适应性,微光可靠性检测系统必不可少.美国、日本等在微光夜视仪可靠性检测实验方面起步很早,其技术水平已经处于世界先进行列,在实验室主要从光度以及光谱两个方面来对夜天光环境进行模拟.我国微光夜视技术起步晚,但发展较快.到现在为止我国的军用设备环境试验标准逐步完善,但是关于微光瞄准镜可靠性检测的研究相对较少,对轻武器瞄具可靠性检测领域进行深入的探索仍是重中之重^[2-5].

光应力系统是微光瞄具可靠性试验的重要内容之一.无限远微光瞄具目标模拟发生装置作为光应力系统为待测瞄具提供微光环境,其出射光照度的均匀性直接影响 CCD 摄像系统成像的清晰度和准确性^[6-8].但是目前国内对可靠性检测设备的研究大多是简单介绍系统的基本原理^[9-11].如文献[9]微光夜视仪检测设备中微光应力源系统研究介绍了提供微光光源的积分球的组成结构,以及提供光应力源的过程;文献[10]用于微光夜视系统检测的夜天光模拟,对夜间光环境进行了分析,选择了模拟光源,为微光夜视仪提供微光照

度.但是均没有考虑积分球光源提供给待测瞄具入瞳处光照度值的问题,缺乏对光照度均匀性的详细研究.本文对实际夜天光环境下进入瞄具入瞳面光照度进行详细研究,以此为依据设计无限远微光瞄具目标模拟发生装置,系统光照度均匀度得到了很大的提升.

1 光应力系统结构组成及工作原理

如图 1,光应力系统主要由大小积分球、平行光管、被测瞄具等组成.其中大小积分球对接为系统提供均匀光,大小积分球之间有可变光阑.标准 A 光源灯发出的光经过小积分球漫反射之后经可变光阑射入大积分球内,通过切换光阑改变进入到大积分球内的光照度值.大积分球出射窗口与平行光管之间采用软连接方式连接,光线在大积分球内经过无数次漫反射后形成的均匀光照射到平行光管的分划板上形成平行光,由于分划板严格置于其焦平面处,分划板的像就位于无穷远,即平行光管模拟了无穷远目标成像.待测瞄具接收平行光管分划板的像,并与瞄具内置小分划板的像叠加被 CCD 采集接收,传输到计算机进行处理.在这一系列过程中积分球产生的均匀光(即光源)的照度会发生一定程度的衰减,对瞄具分换板上像面照度产生影响.

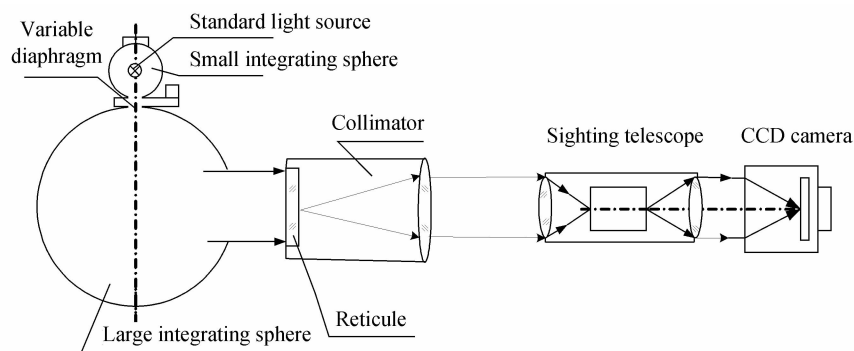


图 1 系统工作原理图

Fig. 1 The principle picture of work system

2 微光瞄具入瞳照度计算

夜天光辐照下,景物亮度与夜天光在地面景物上产生的照度以及景物的反射比有关.如果景物是漫反射体,那么景物的光出射度可表示为

$$M = \rho E = \pi L \quad (1)$$

则景物的亮度为

$$L = \rho E / \pi \quad (2)$$

式中, E 为景物的照度(即夜天光的照度); ρ 为景物的反射比.

微光夜视仪入瞳面照度为

$$E_{ed} = \frac{LS}{H^2} = \rho E \tan^2 \omega \quad (3)$$

式中, H 是目标景物距微光瞄具的距离, S 为微光瞄具有效受照面积, ω 是瞄具的视场角.可见,瞄具入瞳处光照度与景物照度有关,天气状况的不同会对瞄具照度产生很大的影响.

根据检测系统要求,微光瞄准镜需要在无月浓云、无月晴朗、半月晴朗、满月晴朗四种天气状况下瞄准射击,根据式(3)计算微光瞄具入瞳照度,其中待测瞄具视场角 $\omega = 5^\circ$,取 $\rho = 0.7$,结果如表 1.

表 1 不同天气状况下瞄具入瞳照度
Table 1 Illumination at the entrance pupil of sighting telescope under different weather conditions

Weather status	E/lx	E_{ed}/lx
Heavy cloud and no moonlight	2×10^{-4}	1.1×10^{-6}
Clear and no moonlight	1×10^{-3}	5.4×10^{-6}
Clear and half moon	2×10^{-2}	1.1×10^{-4}
Clear and full moon	2×10^{-1}	1.1×10^{-3}

3 平行光管设计及出射光照度分析

平行光管光学设计结果参数为:焦距 $f' = 600$ mm, 入瞳口径 $D_0 = 120$ mm, 出瞳口径 $D_1 = 125$ mm, 视场角 $2\omega' = 10^\circ$. 图 2 为平行光管光学系统结构图, 图 3 为光学系统相对照度分布.

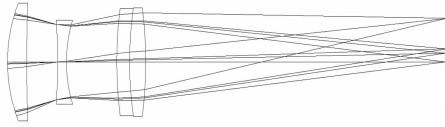


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of optical system

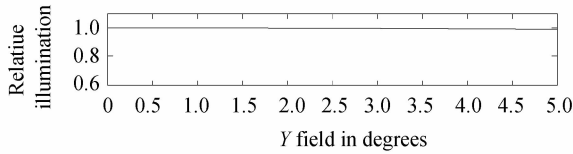


图 3 相对照度分布

Fig. 3 Relative illumination

由图 2 可知, 光学系统由两片单透镜、一组双胶合透镜组成, 每片透镜表面的透射比为 98%, 则光学系统的透过率 $\tau' = 87\%$. 根据图 3, 光学系统在达到最大视场时, 光照度产生了 0.5% 的衰减, 光照度不均度 $\leq 0.3\%$.

已知成像系统轴上像点的照度 E' 、轴外像点的光照度 E'' 分别为^[12-13]

$$E' = \frac{n'^2}{n^2} \tau \pi L_1 \sin^2 U' \quad (4)$$

$$E'' = \frac{n'^2}{n_2} \tau \pi L_1 \sin^2 U' \cos^4 \omega'' = E' \cos^4 \omega'' \quad (5)$$

式中, n' 是像空间折射率, n 是物空间折射率, τ 指的是光学系统的光透射比, L_1 是物面的光亮, U' 是像方孔径角, ω'' 视场角.

从大积分球出射的光照度近似为到达平行光管分划板面上的光照度; 微光瞄具入瞳面接收到的光照度近似等于平行光管出瞳处的光照度. 因此, 平行光管出瞳处的光照度值可表示为

$$E_c = \frac{\varphi_c \cdot \tau'}{S_1} = \frac{M_1 \cdot S_2 \cdot \sin^2 u \cdot \tau'}{S_1} = E_{ed} \quad (6)$$

平行光管像面照度即大积分球出射窗口处光照度 E_{li} 为

$$E_{li} \approx M_1 = \frac{E_c \cdot S_1}{\tau' \cdot S_2 \cdot \sin^2 u} = \frac{E_{ed} \cdot (D_1/2)^2}{\tau' \cdot (f' \cdot \tan \omega')^2 \cdot \sin^2 [\arctan(D_0/2f')]} \quad (7)$$

式中, S_1 是平行光管出瞳处的受照面积, S_2 光管有效像面面积, φ_c 是平行光管像平面中心对物镜口径所张立体角范围内的光通量, τ' 是光学系统的透过率, M_1 是光出射度, u 是孔径角. 根据满足瞄具照度要求时进入到平行光管分划板处的像面照度, 设计积分球式光源.

4 积分球光源设计

如图 4, 根据积分球原理^[14-21], 小积分球出射窗口

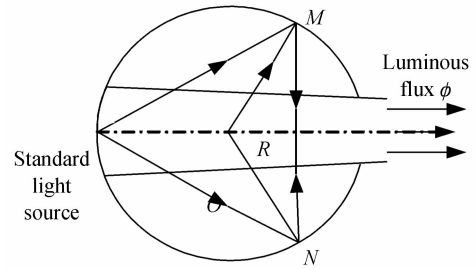


图 4 积分球原理图

Fig. 4 Schematic diagram of integrating sphere

处的光照度为

$$E_{si} = E_0 + E_{\Sigma} = E_0 + \rho' E_0 + \rho'^2 (1 - f_{si}) E_0 + \dots = \frac{\phi_0}{4\pi r^2} + \frac{\rho' \phi_0}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho' (1 - f_{si})} \quad (8)$$

式中, E_0 为光源发出的光直射到某一点的光照度, E_{Σ} 是光源发出的光经过积分球内壁数次漫反射后的光照度之和, ϕ_0 是光源灯的光通量, r 是小积分球的半径, ρ' 指的是积分球的反射比, f_{si} 是小积分球的开孔比且 $f_{si} = h/2r$, h 是小积分球的球冠高度.

小积分球出射窗口处的光通量为

$$\phi_1 = E_{si} S_3 = E_{si} \cdot \pi r_0^2 \quad (9)$$

式中, S_3 是小积分球出射窗口处的受照面积, r_0 是小积分球出射窗口半径.

同理, 光束在大积分球出射窗口处, 即积分球光源最终出射光照度 E_{li} 可表示为

$$E_{li} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n + \dots = \frac{\phi_1}{4\pi R^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho' (1 - f_{li})} \quad (10)$$

则小积分球出射窗口半径 r_0 为

$$r_0 = \sqrt{\frac{\phi_1}{\pi E_{si}}} = \sqrt{\frac{4R^2 [1 - \rho' (1 - f_{li})] E_{li}}{E_{si}}} \quad (11)$$

在微光可靠性检测系统中, 大小积分球对接为系统提供不同强度的光. 这一过程是通过调节大小积分球之间的可变光阑来实现的. 设计选用标准 A 光源灯, 其光通量 ϕ_0 为 630 lm. 大积分球的开孔比 $f_{li} = H/$

2R、球冠高度 $H=10$ mm、半径 $R=500$ mm、小积分球半径 $r=150$ mm、球冠高度 h 为 8.5 mm. 为保证积分球的吸收误差以及光谱选择性误差都较小,积分球的反射比 ρ' 取 0.8. 带入数值,计算在四种天气状况下瞄准射击时,对应微光瞄准镜光照度值的小积分球出射窗口大小,计算结果见表 2. 通过设计相应的可变光阑来实现对光照度的切换,以模拟微光夜视环境,满足微光瞄具对不同光照度的需求,达到测试要求.

表 2 不同光照度下可变光阑口径值
Table 2 Radius of iris diaphragm in different illumination conditions

E_{cd}/lx	E_{it}/lx	r_0/mm
1.1×10^{-3}	1.4×10^{-1}	1.7
1.1×10^{-4}	1.4×10^{-2}	0.5
5.4×10^{-6}	0.7×10^{-3}	0.1
1.1×10^{-6}	1.4×10^{-4}	0.05

5 瞄具安装位置分析

系统成像光路如图 5, d 是分划板直径, D 是平行光管通光口径, D_e 是被测瞄具物镜口径, f' 是平行光管焦距. 根据系统成像光路,如果被测瞄具安装于距离平行光管物镜 l_{min} 距离范围内,则被测瞄具物镜能接收到光管集中的光能量,此时到达瞄具像面上的光照度值最大;而如果瞄具的安装位置与光管物镜之间的间距介于 l_{min} 与 l_{max} 之间,则瞄具只能接收到部分光,光照度大小会产生一定程度的衰减;倘若将待测瞄具安装于大于 l_{max} 距离处,那么只有光源中心的光被接收,此时像面光照度最弱. 其中 $D=130$ mm, $d=112$ mm,不妨取 $D_e=72$ mm.

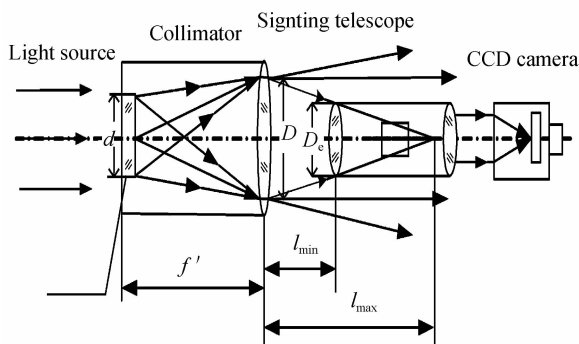


图 5 系统成像过程光路图

Fig. 5 Optical pathway diagram of imaging process

$$l_{max} = \frac{f'}{d} \cdot D = 696 \text{ mm} \quad (12)$$

$$l_{min} = \frac{f'}{d} \cdot (D - D_e) = 311 \text{ mm} \quad (13)$$

实际装调过程中,将待测瞄具安装在距离平行光管物镜较远处,即二者间距小于等于 311 mm,以保证瞄具能够接收到最大的光强度.

6 实验结果与分析

为了模拟各种不同夜天光环境,积分球需要提供相应的可调光照度范围,实验将积分球的光照度分为四个等级,使用宽量程微光照度计测量大积分球出射窗口处的光照度值,根据式(14)计算光照度不均匀度,并对大积分球出射窗口处光照度的测量误差进行分析,结果见表 3.

$$\epsilon = \pm \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \times 100\% \quad (14)$$

式中, E_{max} 是光照度最大值, E_{min} 是光照度最小值.

表 3 大积分球出射窗口处光照度值
Table 3 Illumination of large integrating sphere at its emitting window

The level of illumination/lx	$\times 10^{-1}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-4}$
	1.412	1.431	0.7142	1.432
	1.433	1.423	0.7211	1.419
	1.427	1.418	0.7133	1.425
Actual measured value/lx	1.409	1.446	0.7149	1.435
	1.445	1.439	0.7021	1.452
	1.434	1.447	0.7152	1.444
Average illumination/lx	1.427	1.434	0.7135	1.435
Theoretical value/lx	1.4	1.4	0.7	1.4
Relative error/%	1.9	2.4	1.9	2.5
Non-uniformity(ϵ)/%	1.3	1.0	1.3	1.1

同理,测量如图 6 所示中心点以及边缘点处平行光管出射光照度值,并对光照度均匀性、测量误差进行分析计算,结果如表 4.

光应力系统光照度不均匀度 $\epsilon < 2\%$, 实验测量值与计算值完全满足系统对微光光照度的要求.

通过实验研究发现,标准 A 光源灯发出的光经大小积分球漫反射后出射的均匀光,经过平行光管以后到达瞄具像面上的照度会产生衰减. 而这一过程中影响最终到达待测瞄具照度值大小的因素主要有大小积

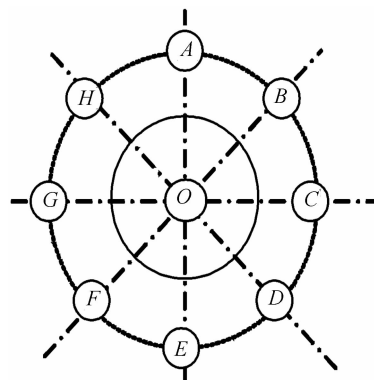


图 6 平行光管光照度测试点分布

Fig. 6 Illumination distribution of measurement points of collimator

表4 平行光管出射窗口处光照度值

Table 4 Illumination of collimator at its emitting window

The level of illumination/lx	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-6}$	$\times 10^{-6}$
O/lx	1.124	1.122	5.462	1.116
A/lx	1.135	1.137	5.455	1.137
B/lx	1.146	1.124	5.427	1.126
C/lx	1.151	1.143	5.443	1.148
D/lx	1.148	1.145	5.473	1.153
E/lx	1.129	1.157	5.409	1.139
F/lx	1.150	1.135	5.453	1.127
G/lx	1.137	1.146	5.438	1.152
H/lx	1.142	1.139	5.446	1.144
Average illumination/lx	1.140	1.139	5.445	1.138
Calculated value/lx	1.1	1.1	5.4	1.1
Relative error/%	3.7	3.5	0.8	3.5
Non-uniformity(ϵ)/%	1.2	1.5	0.6	1.6

分球之间可变光阑的大小、平行光管的视场、及被测瞄具距离平行光管物镜的安装位置。所以,在实际设计中要综合考虑这三个因素,在设计平行光管时,光管视场要小于瞄具视场,实际装调过程要保证将待测瞄具安装在距离平行光管出射窗口较近位置处,以便得到最大光照度。

7 结论

根据检测系统要求,光应力分系统需要为瞄准镜提供四档不同强度的光照度。本文根据实际夜间光环境下景物的照度,计算出到达微光瞄准镜入瞳处的光照度值,即平行光管出瞳处的光照度。根据光在平行光管光学系统传播过程中光学量的变化规律,得到光管分划板面上的光照度值,即积分球式光源出射的光照度值。通过研究分析积分球光源的原理,根据计算的光照度值,设计了大小积分球之间的可变光阑。最后,用照度计测量平行光管入口以及出口处的光照度值,结果表明,光应力分系统的光照度不均匀度 $\epsilon < 2\%$, 满足技术要求。同时,通过研究得出了影响待测瞄准镜光照度值的三个关键因素,具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] YU Qiu-shui, AN Zhi-yong, YANG Rui-ning, *et al.* Test of parallax parameters for optoelectronic sight in small arms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1732-1737. 于秋水, 安志勇, 杨瑞宁, 等. 轻武器光学瞄具的视差参数测试[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1732-1737.
- [2] GABER L. Optical sight system with wide range of shooting distances: US, 6, 487, 809 B1[P], 2002-12-3.
- [3] HIDEKI K. Illumination optical system, illumination optical apparatus, exposure apparatus, and device manufacturing method: US, 20,090,040,493 A1 [P], 2009-2-12.
- [4] BIBTEX R E. Optical system for generating illumination strip: CN, 1, 957, 247 B [P], 2005-3-15.
- [5] GAO You-tang, QIU Ya-feng, TIAN Si, *et al.* Mechanism analysis of zero displacement movement of LLL sight device based on vibration experimental condition [J]. *Acta*

Armamentaria, 2008, **29**(9): 1074-1077.

- 高有堂, 邱亚峰, 田思, 等. 振动试验条件下微光瞄准镜零位移机理分析[J]. *兵工学报*, 2008, **29**(9): 1074-1077.
- [6] ZHONG Xing, ZHANG Yuan, JIN Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. *Acta Optica Sinica*. 2012, **3**(3): 217-222. 钟兴, 张元, 金光. 大视场光学系统像面照度均匀性优化[J]. *光学学报*, 2012, **3**(3): 217-222.
- [7] SHEN Xiang-heng, YANG Liang, HE Geng-xian, *et al.* Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2513-2536. 沈湘衡, 杨亮, 贺庚贤, 等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2513-2536.
- [8] WANG Li, HE Geng-xian, SHEN Xiang-heng. A system for examining the image planes' illumination non-uniformity of image forming system on photoelectric measuring equipment using CCD[J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, **28**(3): 212-215. 王力, 贺庚贤, 沈湘衡. 基于面阵 CCD 的光电测量设备光学系统像面照度不均匀度测量系统[J]. *光电子技术*, 2008, **28**(3): 212-215.
- [9] YANG Lei. Study on the low-light level stress source system of low-light level night vision device testing equipment [D]. Changchun: Changchun university of Science and Technology, 2014. 杨磊. 微光夜视仪检测设备中微光应力源系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [10] SHI Ji-fang, LIU Yu. Night sky radiation simulation for test of low-level-light night vision systems [J]. *Journal of Applied Optics*, 2003, **24**(5): 11-13. 史继芳, 刘宇. 用于微光夜视系统检测的夜天光模拟[J]. *应用光学*, 2003, **24**(5): 11-13.
- [11] YE Yuan-long, WU Xiao-rong. Simulation of low-light-level condition in laboratory [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **35**(12): 942-943. 冶元龙, 伍小蓉. 实验室条件下微光环境模拟[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(12): 942-943.
- [12] 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 2-3.
- [13] 王永仲. *鱼镜头光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 61-64.
- [14] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, LI Xian-sheng, *et al.* Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 960-965. 刘洪兴, 任建伟, 李宪圣, 等. 基于 LightTools 的大口径积分球辐射特性仿真[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(4): 960-965.
- [15] WANG Gao-ming, GUO Cheng, ZHANG Liang-liang, *et al.* Simulation of the light energy uniformity of integrating sphere based on Monte Carlo method [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(1): 67-69.
- [16] SU Cheng-zhi, CAO Guo-hua, XU Hong-ji. Relationship analysis of output illuminance of integrating sphere and incident beam geometry [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(2): 195-199. 苏成志, 曹国华, 徐洪吉. 积分球出射照度与入射光束几何性质关系分析[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(2): 195-199.
- [17] JERNESHJ K D, HASSING S. Analysis of reflectance and transmittance measurements on absorbing and scattering small samples using a modified integrating sphere setup [J].

- Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 879-888.
- [18] MCKEE G, PAL S, SETH H, *et al.* Design and characterization of a large area uniform radiance source for calibration of a remote sensing imaging system[C]. SPIE, 2007, **6677**: 1-10.
- [19] 郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010: 48-51.
- [20] LUCKE R L. Lambertian radiance and transmission of an integrating sphere[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(28): 6966-6970.
- [21] LU Li-gen, ZHANG Bao-zhou, ZHANG Jun-yuan. Effects of integrating sphere non-neutrality on output spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1127-1131.
- 卢利根, 张保洲, 张军远. 积分球非中性对出射光谱的影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1127-1131.