

基于 LightTools 的大口径积分球辐射特性仿真

刘洪兴^{1,2}, 任建伟¹, 李宪圣¹, 万志¹, 刘则洵¹, 李葆勇¹, 孙景旭¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了研制辐射特性相对理想的大口径积分球, 采用 LightTools 仿真分析了 5 种光源位置和 3 种照明模式, 共 15 种直径为 3 m 积分球模型的辐照度面均匀性和朗伯特特性。相比依靠经验设计积分球, 计算机仿真研究具有周期短、成本低、重复性高等优点。仿真结果表明: 照明模式和光源位置对积分球开口处辐照度面均匀性影响很小; 而对开口处朗伯特特性产生较大影响。首先, 光源方向上的朗伯特特性最差, 其次, 对称式照明模式则会改善朗伯特特性, 另外, 随着光源与积分球前后半球交汇面的距离不断增加, 积分球的朗伯特特性逐步变优。最后, 测试了直径为 3 m 积分球在不同照明模式下的辐照度面均匀性、光源方向和垂直方向的朗伯特特性, 实测辐射特性与仿真结果相吻合。

关键词: 辐射特性; 计算机仿真; 积分球; 遥感; LightTools

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0960-06

Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools

Liu Hongxing^{1,2}, Ren Jianwei¹, Li Xiansheng¹, Wan Zhi¹, Liu Zexun¹, Li Baoyong¹, Sun Jingxu¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to develop the large aperture integrating sphere with perfect radiometric characteristics, 15 integrating sphere models with 5 different lamp positions and 3 different illumination models were built and simulated by LightTools, and their irradiance plan uniformity and Lambert characteristic were analyzed. Compared with designing by experience, computer simulation has the advantage of short period, low cost and good repeatability. Simulation results indicate that lamp positions and illumination models have less effect on irradiance plan uniformity, however have more effect on Lambert characteristic. The Lambert characteristic of lamp direction is worse than other directions, symmetrical illumination model improves the Lambert characteristic, and the Lambert characteristic usually becomes better with the distance between the light source and the joint plan of both hemispheres increasing. The irradiance plan uniformity, the Lambert characteristic of light source's direction and the Lambert characteristic of light

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-09

基金项目: 国家 863 项目(863-2-5-1-13B)

作者简介: 刘洪兴(1986-), 男, 博士生, 主要从事辐射定标技术应用方面的研究。Email: lhxing_888@126.com

导师简介: 任建伟(1956-), 男, 高级工程师, 主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。

Email: Renjw@ciomp.ac.cn

source's vertical direction of a 3 m integrating sphere were tested, with different illumination models, and the measured performance agreed well with simulation results.

Key words: radiometric characteristics; computer simulation; integrating sphere; remote sensing; LightTools

0 引言

实验室辐射定标是光学遥感器研制中的一个重要环节,其作用是建立光学遥感器辐射输入与最终电信号输出之间的响应函数。遥感器的实验室辐射定标应遵循全孔径、全视场和端对端的原则^[1],扩展辐射源作为相机实验室辐射定标的标准光源,要求能够对相机进行全孔径、全视场的照明。因此,扩展辐射源不仅需要满足尺寸要求,还应具备较为理想的辐射特性,即理想的辐照度面均匀性和辐亮度角度均匀性(又称余弦特性或朗伯特特性)。大口径积分球光源是一种相对理想的均匀漫射扩展源^[2-3],是已经被公认的空间光学遥感器的辐射定标扩展源。随着空间光学技术的飞速发展,空间光学遥感器的分辨率越来越高,光学系统口径也越来越大,这就要求积分球定标光源的开口越来越大,研制大口径积分球势在必行。

由于积分球内壁涂层并非理想余弦发射体球以及遮挡屏和光源的存在,实际使用的积分球的工作状况会偏离理想球^[4],只有合理地布置光源和遮挡屏位置,积分球的辐射特性才会达到最优^[5-6]。以往积分球设计和内部光源布置大都凭借经验来设计,如积分球开口比不大于5%等,然而,随着积分球的尺寸不断增大,如果仅凭经验布置积分球的光源和遮挡屏的位置,然后选出辐射性能最优的积分球,那么研制工作不仅承担巨大的风险,而且成本大大增加、时间周期也会大大延长。随着计算机性能不断增强,仿真技术得到迅猛发展,这为采用计算机仿真设计积分球提供了强大的技术保证。LightTools是由美国 Optical Research Associates 公司研制开发的一款光学系统建模仿真软件,可以精确地定义各种实际光源(如发光二极管、白炽灯、弧光灯、卤素灯等)的形状和发光特性,利用其照明模块(Illumination Module)可实现蒙特卡洛法(Monte Carlo)光线追迹,以便确定某个(或某几个)指定表面上的光照度、强

度或亮度,因此广泛应用在光学仿真领域。文中以直径为3 m积分球为例,采用LightTools仿真分析了不同光源位置和照明模式对积分球辐射特性的影响,并通过测试直径为3 m积分球的辐射特性验证了仿真分析的可行性,为大口径积分球的研制奠定了基础。

1 影响积分球辐射特性的因素

积分球光源是一个内表面为高反射率球形腔,在该球形腔内置光源可在其内表面形成等照度球面,若在该球面上开口,则该开口上的输出辐射亮度 L 与内置光源辐射通量、积分球半径、内表面反射率以及积分球开口比相关,积分球辐射亮度方程^[7]为:

$$L_s = \frac{\Phi}{\pi A_s} \times \frac{\rho}{1 - \rho(1-f)} \quad (1)$$

式中: Φ 为积分球入射辐射通量; $A_s = \pi d^2$ 表示直径为 d 的积分球内表面面积; ρ 为积分球内表面反射率; f 为积分球开口比: $f = \frac{\sum A_i}{A_s}$, $\sum A_i$ 为积分球总开口面积^[8-10]。

积分球开口比、内表面反射率、遮挡屏、光源的位置和照明模式影响积分球辐射特性的重要因素。开口比取决于积分球直径以及总开口面积,内表面反射率则取决于反射涂料的性能和喷涂技术水平,两者在积分球研制过程中是固定的。遮挡屏的作用是避免光源发出的光直射到积分球出光口从而影响测量结果。另外,遮挡屏会使积分球实际工作状况偏离理想球也会影响测量结果。因此,在避免光源直射到出光口的前提下,遮挡屏的尺寸越小越好。所以,光源的位置和照明模式是积分球研制过程中重点考虑的因素。文中以直径为3 m积分球为例,采用LightTools仿真分析光源位置和照明模式对积分球辐射特性的影响。

2 LightTools 仿真模型建立

2.1 积分球结构和光学性能参数

外球直径为3 040 mm,内球直径为3 000 mm,内

表面属性为朗伯漫反射面,反射率为 98%,漫射光线的数目为 1。出光口位于前半球上,如图 1 所示,开口直径为 1 000 mm。

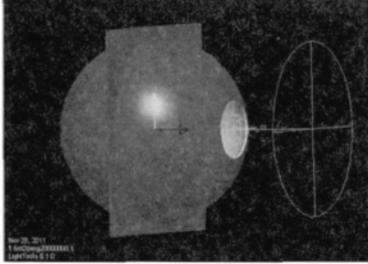


图 1 积分球模型

Fig.1 Model of integrating sphere

2.2 光源与遮挡屏参数

溴钨灯是积分球常用内部光源,由于溴钨灯发光部分尺寸比起积分球尺寸小得多,因此,仿真中采用点光源代替溴钨灯,每只光源功率为 1 000 W。光源位于前半球内壁,并且光源所在面与积分球前后半球相交面平行。仿真模型中照明模式包括三种:照明模式 A(竖直方向一只光源)、照明模式 B(竖直方向两只对称光源)和照明模式 C(竖直和水平方向各两只对称光源)。光源位置由光源所在面与前后半球相交面的距离 d 定义, d 取值包括 250 mm、500 mm、750 mm、1 000 mm 和 1 250 mm。遮挡屏的设计原则为:在避免光源直射到出光口前提下,遮挡屏的尺寸越小越好,遮挡屏的表面属性为朗伯漫反射面,反射率为 98%。

2.3 接收器参数

仿真中需要接收两种辐射量,开口处不同位置的辐照度和不同角度方向的辐亮度。辐照度,单位为 W/mm^2 。接收面积是与积分球开口同心的 $1\ 000\ mm \times 1\ 000\ mm$ 区域,划分为 20×20 网格。辐亮度,单位为 $W/(mm^2 \cdot sr)$ 。接收面积是与积分球开口同心的 $500\ mm \times 500\ mm$ 区域,角度设置为经度 $0^\circ \sim 360^\circ$,纬度 $90^\circ \sim 180^\circ$,角度间隔均为 5° ,划分为 20×18 角度网格。

2.4 系统仿真参数

追迹光线数目 N 为 40 000 000 条,相对光线能量阈值为 0.001。

3 仿真结果分析与验证

5 种光源位置和 3 种照明模式共 15 种积分球仿真模型。LightTools 的仿真结果输出包括图形输出方

式和数字输出方式。

3.1 图形化输出方式

图形输出方式形象直观。图 2 中,图(a)和图(b)为两种仿真模型在积分球开口水平(0°)和竖直(90°)方向的辐亮度角度线条图(Line Chart),不同的同心圆代表不同的辐亮度。图(a)的参数为:照明模式 A, $d=500\ mm$; $N=40\ 000\ 000$,图(b)的参数为:照明模式 C, $d=500\ mm$; $N=40\ 000\ 000$ 。图(b)中水平和竖直方向的朗伯特特性相当,而图(a)中水平方向上的朗伯特特性明显优于竖直方向。

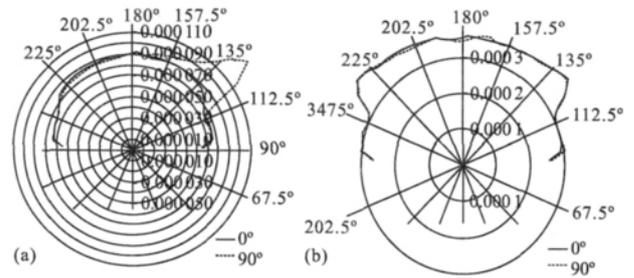


图 2 两种积分球模型的辐亮度线条图

Fig.2 Radiance line chart of two integrating sphere model

3.2 数字化输出方式

数字输出方式更适用于定量化分析辐照度面均匀性和朗伯特特性。辐照度面均匀性常用辐照度面非均匀度表征,即出光口平面内不同位置的辐照度相对标准偏差,计算公式为:

$$u = \text{Std}(E_i) / \bar{E} \times 100\% \quad (2)$$

式中: u 为辐照度面非均匀度; E_i 为不同位置的辐照度值; \bar{E} 为不同位置辐照度的平均值; $\text{Std}(E_i)$ 为不同位置辐照度的标准偏差。

朗伯特特性常用辐亮度角度非均匀度表征,即积分球出光口不同角度方向的辐亮度相对标准偏差,辐亮度角度非均匀度越小则朗伯特特性越好,计算公式为:

$$v = \text{Std}(L_i) / \bar{L} \times 100\% \quad (3)$$

式中: v 为辐亮度角度非均匀度; L_i 为各角度的辐亮度值; \bar{L} 为各角度辐亮度平均值; $\text{Std}(L_i)$ 为各角度辐亮度值的标准偏差。理想积分球是个朗伯光源,各角度的辐亮度一致,辐亮度角度非均匀度为 0。

表 1 为 15 组仿真模型追迹 40 000 000 条光线后计算的辐照度面非均匀度和辐亮度角度非均匀度。辐照度面非均匀度的有效计算面积为 $700\ mm \times 700\ mm$

区域,辐亮度非均匀度有效计算角度为 $\pm 60^\circ$ 。

表 1 15 组仿真模型的辐照度面非均匀度和辐亮度角度非均匀度

Tab.1 Irradiance plan nonuniformity and radiance angular nonuniformity of 15 integrating sphere models

Illumination mode	One lamp		Two lamps		Four lamps		
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	
Lamp positions	250 mm	0.82%	10.4%	0.76%	7.25%	0.75%	5.72%
	500 mm	0.80%	8.60%	0.76%	5.16%	0.70%	3.14%
	750 mm	0.78%	6.69%	0.68%	3.84%	0.76%	2.20%
	1 000 mm	0.80%	4.21%	0.74%	2.39%	0.68%	1.60%
	1 250 mm	0.87%	2.69%	0.76%	1.52%	0.78%	1.34%

仿真结果表明:照明模式和光源位置对积分球出口处的辐照度面均匀性的影响很小,而相比之下,朗伯特性受到的影响则较为明显。

在照明模式 A、B、C 下,光源在不同位置时的辐照度面非均匀度的相对偏差分别在 5%、5%~6% 以内,而当光源位置 *d* 固定时,照明模式 A、B、C 的出光口辐照度面非均匀度的相对偏差均不超过 9%。

当光源位置 *d* 固定时,对称式的照明模式会降低辐亮度角度非均匀度,并且对称性越好则积分球辐亮度角度非均匀度越低。例如,当光源位置 *d* 为 250 mm 时,与照明模式 A 相比,照明模式 B 和 C 的辐亮度角度非均匀度分别降低了 30.2% 和 45.0%。而当照明模式固定时,光源的位置明显影响到辐亮度角度非均匀度。随着光源位置 *d* 不断增加,出口处的辐亮度角度非均匀度逐渐变小。例如在照明模式 C 下,光源在 *d* 为 1 250 mm 处的辐亮度角度非均匀度为 1.34%,明显优于 *d* 为 250 mm、500 mm、750 mm 以及 1 000 mm 处的 7.52%、3.14%、2.20% 和 1.60%。

表 1 中给出了所有方向上总的辐亮度角度非均匀度,而从细节上由于光源和挡板的存在会影响了光源附近方向上的辐亮度角度非均匀度(确切地说,影响光源对侧的辐亮度角度非均匀度)。例如,图 3 中在照明模式 A 下,*d* 为 250 mm 时各经度方向辐亮度角度分布曲线,图中两条曲线(81°和 99°方向)在 $-20^\circ \sim -45^\circ$ 处明显翘起,此处两条曲线所对应的经度最靠近光源方向。同理,图 4 中在照明模式 C 下,*d* 为 1 250 mm 时

各经度方向辐亮度角度分布曲线,图中 4 条曲线(9°、81°、99°和 171°方向)两侧在均翘起也是这个原因。此外,仿真结果还表明,积分球在光源方向的一定角度范围内依旧保持良好的朗伯特性,光源位置 *d* 最大处时的角度范围最大,这是由于此时挡板对积分球偏离理想工作状态的影响程度最小。例如,图 3 在 $\pm 20^\circ$ 角度内保持良好的朗伯特性,而图 4 则在 $\pm 70^\circ$ 角度范围内保持良好的朗伯特性。

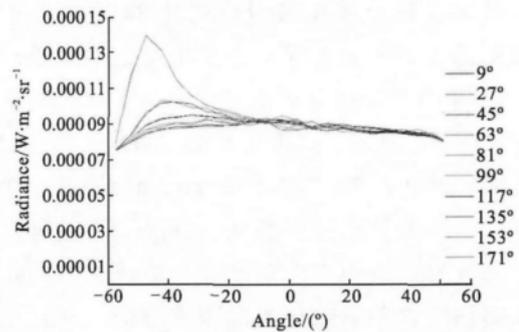


图 3 照明模式 A, *d* 为 250 mm 时各经度方向辐亮度角度分布曲线
Fig.3 Radiance angular distributing curves in different longitude angle of illumination model A and *d*=250 mm

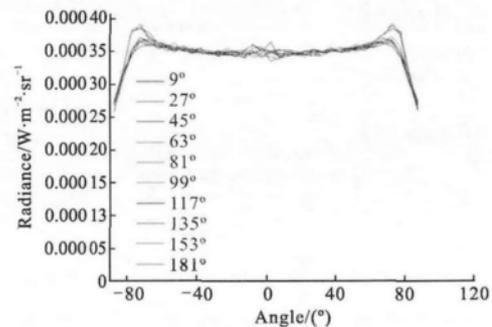


图 4 照明模式 C, *d* 为 1 250 mm 时各经度方向辐亮度角度分布曲线
Fig.4 Radiance angular distributing curves in different longitude angle of illumination model C and *d*=1 250 mm

15 组仿真结果中,照明模式 C、*d*=1 250 mm 积分球模型的辐射特性最优。

3.3 积分球辐射特性测试

为了验证仿真结果,测试了现有积分球的辐射特性,积分球内径为 3 000 mm,开口直径为 1 000 mm,光源与前后半球交汇面的距离为 700 mm。

测试了积分球在照明模式 A、B 和 C 下的辐照度面非均匀度,探测器有效面积为 2 mm×2 mm,测试面积为 400 mm×400 mm 方形区域,测试间隔为 100 mm,每个照明模式下测试 5×5 个点,每个点测

试三次取平均值。照明模式 A、B 和 C 下的辐照度非均匀度分别为 0.279%、0.270%和 0.285%，三者相对偏差不超过 6%。由于仿真模型建模以及非均匀度的计算方法与实际模型不完全一致，实测照明模式 A、B 和 C 下辐照度面非均匀度与模式 A、B 和 C 下， $d=750\text{ mm}$ 时的仿真结果并不完全一致，但是实测结果中，照明模式对辐照度面非均匀度的影响不大，与仿真结果相吻合。

测试了积分球在照明模式 A 和 B 下的光源方向和光源垂直方向上的辐亮度角度分布曲线，角度范围为 $\pm 45^\circ$ (0° 为积分球出光口法线方向)，测量间隔为 5° ，各角度测试三次取平均值。测试仪器为 Photo Research 公司的 PR-735 Spectrascan ($380\sim 1\ 080\text{ nm}$)。图 5 和图 7 分别为照明模式 A 和 B 下，光源方向和光源垂直方向的辐亮度角度分布曲线，图中光源方向的朗伯特特性明显差于光源垂直方向，并且光源对侧的辐亮度明显翘起，与仿真结果图 6 和图 8 相吻合，

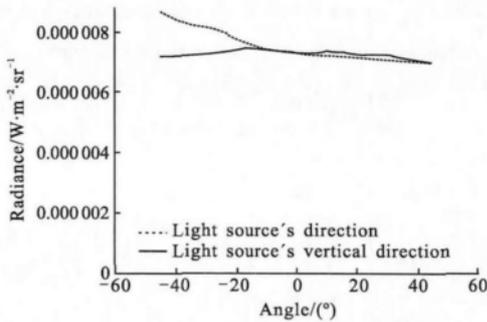


图 5 照明模式 A 下，光源方向和光源垂直方向辐亮度角度分布曲线
Fig.5 Radiance angular distributing curves in light source's direction and light source's vertical direction of illumination model A

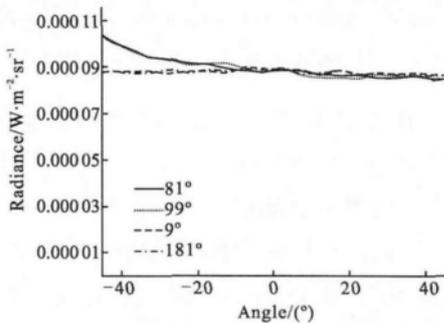


图 6 照明模式 A 下， $d=750\text{ mm}$ 处的光源方向和光源垂直方向附近辐亮度角度分布曲线
Fig.6 Radiance angular distributing curves in light source's direction and light source's vertical direction of illumination model A and $d=750\text{ mm}$

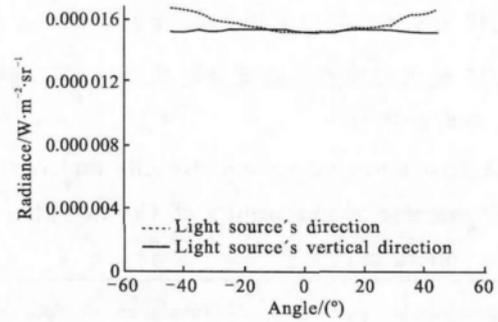


图 7 照明模式 B 下，光源方向和光源垂直方向辐亮度角度分布曲线
Fig.7 Radiance angular distributing curves in light source's direction and light source's vertical direction of illumination model B

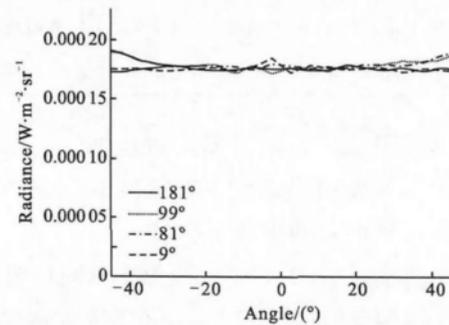


图 8 照明模式 B 下， $d=750\text{ mm}$ 处的光源方向和光源垂直方向附近辐亮度角度分布曲线
Fig.8 Radiance angular distributing curves in light source's direction and light source's vertical direction of illumination model B and $d=750\text{ mm}$

图 6 和图 8 中，在照明模式 A 和 B 下的 $d=750\text{ mm}$ 时光源方向和光源垂直方向的辐亮度角度分布曲线， 81° 和 99° 对应着与光源方向 (90°) 最为接近的经度， 9° 和 181° 对应着与光源垂直方向最为接近的经度。

4 结 论

积分球辐射源是以统计特性为基础的辐射源，文中采用蒙特卡洛光线追迹法仿真分析了光源位置和照明模式对积分球辐射特性的影响，并利用实测结果验证了仿真科学的科学性。仿真分析中，由于模型建模以及分析方法与实际积分球不完全一致，虽不能得到实际积分球的辐射特性精确值，但是可以用于不同积分球模型之间的辐射特性相对比较，以选取辐射特性最优的积分球模型，这为大口径积分球光源的研制奠定了基础。

此外，伴随着光学遥感技术不断发展，遥感相机

可采用同轴、离轴三反等不同光机结构,这也导致空间相机的遮光罩口不仅仅局限于圆形,而积分球开口往往要根据空间相机遮光罩口形状和尺寸设计,光学仿真研究则为此类积分球研制提供技术支持。

参考文献:

- [1] Ren Jianwei, Liu Zexun, Wan Zhi, et al. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1491-1497.
- [2] Wang Yi, Hong Jin, Yang Weifeng, et al. Light resource of on-board calibration for multi-angle polarized radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2480-2483. (in Chinese)
王羿, 洪津, 杨伟峰, 等. 多角度偏振辐射计星上定标光源[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2480-2483.
- [3] Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, et al. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (6): 1365-1373. (in Chinese)
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1365-1373.
- [4] Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry, Photometry, Colorimetry Theory and Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009, 163-166. (in Chinese)
金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009, 163-166.
- [5] Wang Yi, Hong Jin, Yang Weifeng, et al. Light resource of on-board calibration for multi-angle polarized radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2480-2483. (in Chinese)
王羿, 洪津, 杨伟峰, 等. 多角度偏振辐射计星上定标光源[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2480-2483.
- [6] Song Maoxin, Yang Benyong, Yuan Yinlin, et al. Structure design and test of onboard calibration integrating sphere of multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2338-2344. (in Chinese)
宋茂新, 杨本永, 袁银麟, 等. 多角度偏振辐射计星上积分球结构设计及检测[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2338-2344.
- [7] Liu Hongxing, Sun Jingxu, Liu Zexun, et al. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1447-1454. (in Chinese)
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1447-1454.
- [8] Greg Mckee, Samir Pal, Harish Seth 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.
- [9] Robert Llucke. Lambertian radiance and transmission of an integrating sphere[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(28): 6966-6970.
- [10] Liu Weifeng, Zhao Guomin, Xie Yongjie, et al. Calibration and data analysis of sky-light radiation luminance measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 713-717. (in Chinese)
刘伟峰, 赵国民, 谢永杰等. 天空光辐射亮度测量系统定标及数据分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 713-717.