

doi:10.3788/gzxb20154409.0922002

# 基于 LightTools 的大口径月球模拟器 设计与准确度分析

刘石<sup>1,2</sup>, 张国玉<sup>1,2</sup>, 孙高飞<sup>1,2</sup>, 王凌云<sup>1,2</sup>, 高玉军<sup>3</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

**摘要:**为了满足月球传感器和导航传感器对月球目标的观测需要,设计了大口径高辐亮度月球模拟器,其有效辐照面积为  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$ . 利用照明分析软件 LightTools,通过建模与追迹方法对模拟器的月相、辐亮度和均匀度进行设计、仿真和分析. 设计月相目标与月球亮度控制系统,对 14 种典型月相及其辐亮度进行实时控制,提出 LED 灯阵的辐亮度修正方法提高系统均匀度. 测试结果表明:经过修正后,模拟器的辐亮度均匀度优于 15.7%. 该模拟器可作为月球观测目标供传感器识别.

**关键词:**月球模拟器;均匀度;辐亮度;准确度分析;LightTools

中图分类号:V524.7; TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)09-0922002-5

## Design of the Moon Simulator with Large Diameter Based on LightTools and Precision Analysis

LIU Shi<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-yu<sup>1,2</sup>, SUN Gao-fei<sup>1,2</sup>, WANG Ling-yun<sup>1,2</sup>, GAO Yu-jun<sup>3</sup>

(1 College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun 130022, China)

(2 Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center,  
Changchun 130022, China)

(3 Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of observations of the moon as its target by navigation sensors and rendezvous and docking sensor, the moon simulator with large diameter and high irradiation uniformity was designed, the effective irradiation area is  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$ . Using LightTools software, the phases, radiance and uniformity of the moon simulator were designed, simulated and analyzed by modeling and tracing method. The phases of the moon and radiance control system was designed to control the 14 typical phases and radiance of the moon in real time. The radiance correction method of the LED array was put forward to improve the uniformity of the simulator. The test results show that the irradiation uniformity of the simulator is better than 15.7% after correction. It indicated that the simulator can be used as the target for sensor identification.

**Key words:** Moon simulator; Irradiation uniformity; Radiation luminance; Precision analysis; LightTools

**OCIS Codes:** 220.4830; 220.2945; 220.4840

基金项目:吉林省科技发展计划项目(No. 20150520093JH)资助

第一作者:刘石(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为航天地面测试设备. Email:2811792642@qq.com

通讯作者:孙高飞(1985—),女,讲师,博士,主要研究方向为航天地面测试设备. Email:51579428@qq.com

收稿日期:2015-04-16;录用日期:2015-07-03

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

## 0 引言

随着我国航天事业的迅猛发展,越来越多的敏感器将月球<sup>[1]</sup>作为观测目标,尤其是月球敏感器、导航敏感器等,从而促进了月球模拟器的研制<sup>[2]</sup>.

月球是地球的固态卫星,也是离地球最近的天体.它本身不发光,只反射太阳光.月球平均亮度为太阳亮度的 $1/465000$ ,亮度变化幅度为 $1/630000$ 至 $1/375000$ .月球的亮度随月相变化而变化,满月时亮度平均为 $-12.7$ 等,比上下弦要大十多倍,对大地的照度平均为 $0.22lx$ .月球模拟器是一种在实验室条件下,模拟月球几何特征、辐射特性以及特定“月相”的地面测试设备.

传统月球模拟器体积大,模拟月形变化时,设计结构复杂,且波段较窄<sup>[3-4]</sup>.本文根据月球形状和辐亮度

的变化规律,设计月相目标可变且亮度可控的月球模拟器.利用 LightTools 对月相目标进行精确建模与仿真,建立了光源组合模型,分析光源组合模型中各个 LED<sup>[5-8]</sup>对亮度均匀度的影响,计算光源的最优组合,实现在  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  发光模拟范围内,14 种特定月相的模拟,其中,满月月相模拟亮度优于  $100\ \text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$ ,均匀性优于 20%.

## 1 月球模拟器的组成

月球模拟器主要由电源、可变亮度月相目标模拟照明系统、多点可控月相模拟矩阵式 LED 照明系统、月相目标与月球亮度控制系统、散热系统和匀光板<sup>[9]</sup>等组成,如图 1.

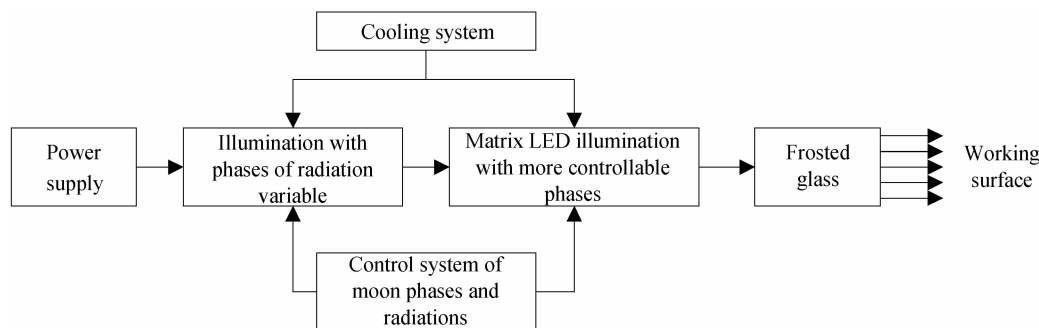


图 1 月球模拟器的组成框图

Fig. 1 Components and working principle of the moon simulator

由电源控制可变亮度月相目标模拟照明系统发出亮度可调的光斑,经过匀光板的匀化处理后,在距匀光板 1 m 处可形成亮度大于  $100\ \text{W}/\text{sr}\cdot\text{m}^2$  的  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  发光圆面,即满月月相.由月相目标与月球亮度控制系统分别控制可变亮度月相目标模拟照明系统和多点可控月相模拟矩阵式 LED 照明系统,对月相形状与亮度进行调制,可连续实现新月娥眉月、残月娥眉月、上弦月、下弦月、上凸月、下凸月等 14 种典型月相的模拟.其中,散热系统用于对月球模拟器散热,保证模拟器正常工作.

## 2 月相模拟与辐亮度设计

为实现月相的几何特征和辐射特性模拟,针对每种月相分别从多点可控月相模拟矩阵式 LED 照明系统中 LED<sup>[10-14]</sup>的排布和可变亮度月相目标模拟照明系统的控制两方面进行设计与分析.

利用照明系统分析软件 LightTools,通过建模与追迹 6000 万条光线对大口径月球模拟器的月相、辐亮度及发光面均匀度等进行设计、仿真及分析.

根据不同的月形模拟需求,以满月为例,如图 2 所示,利用  $16\times 16$  个 LED 灯阵组成满月月相,每个 LED 灯阵由  $4\times 4$  个 LED 组元组成,每个 LED 组元由  $3\times 3$

个 LED 组成,共计 36864 个 LED(共计 9 种不同波段的 LED,每种波段的 LED 发散角、亮度值和辐射强度均不相同)构成,且每组 LED 灯阵分别由月相目标与月球亮度控制系统进行分区控制.使用时,将所有 LED 点亮,实现满月月相模拟.

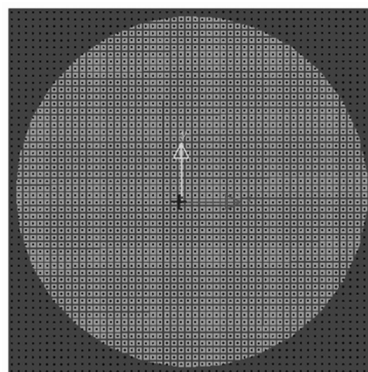


图 2 满月月相的 LED 排列示意图

Fig. 2 Structure diagram of the LED array for full moon

按设计要求在仿真系统中设置 LED 和匀光板,并在理论发光面表面设置亮度接收面.其中,匀光板采用浮法玻璃打磨发毛制作,尺寸为  $\Phi 2\ 050\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$ ,平面度要求为小于 5 mm.

根据仿真数据,分别计算  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  范围内,测试距离为 1 m 位置处的最小亮度仿真值和亮度均匀

度,满月月相的亮度仿真结果如图 3.

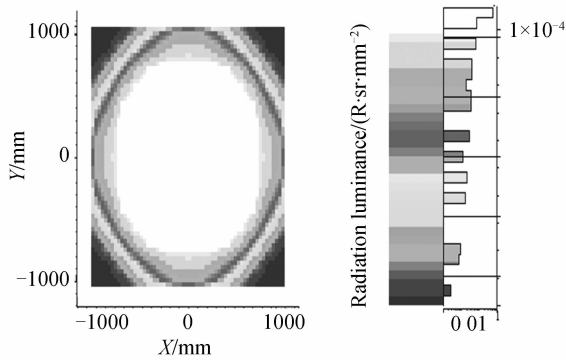


图 3 满月月相的发光面亮度仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of the radiation luminance for full moon

根据满月月相的发光面照度模拟结果,利用式(1)计算亮度均匀性,计算结果如表 1.

$$S = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{M_{\max} + W_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

表 1 发光面表面亮度均匀度

Table 1 Uniformity of the radiation for the working surface

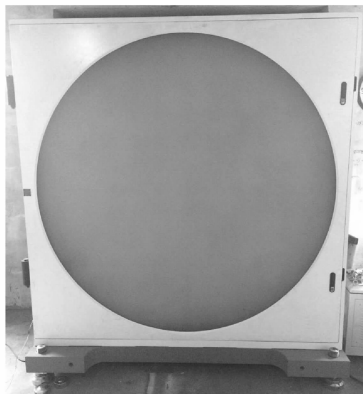
Phases of the moon	Maximum radiation $W_{\max}/$ (W/sr · m <sup>2</sup> )	Minimum radiation $W_{\min}/$ (W/sr · m <sup>2</sup> )	Uniformity of the radiation S
Full moon	526 W/sr · m <sup>2</sup>	386 W/sr · m <sup>2</sup>	15.4%

从表中可以看出,利用 LightTools 仿真得到的数据可以完全实现月球模拟器的辐亮度要求,辐亮度值约为指标的 3~5 倍,且均匀度优于 20%.

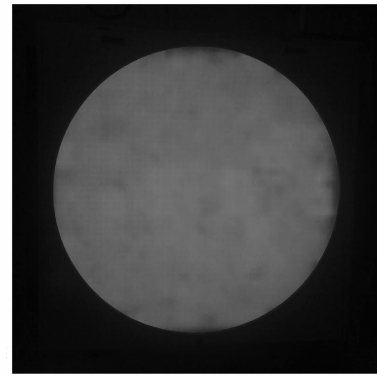
### 3 模拟准确度调整与分析

为了验证月球模拟器的月相模拟方法、辐亮度和均匀度模拟结果,设计月相目标与月球亮度控制系统,对不同月相和月球亮度进行实时控制,并利用 AVANTES-1 型辐亮度计(测量光谱范围 350~1 100 nm,测定角 2°,光谱准确度 0.2 nm,不确定度优于 8%)作为测量设备,对辐亮度值进行实时测试.

设计的大口径月球模拟器如图 4,月相显示为满月月相,测试当前状态下的辐亮度值,并计算均匀度.



(a) Photos of the moon simulator with large diameter



(b) Photos of the simulation of a full moon

图 4 大口径月球模拟器及满月月相的实物照片图

Fig. 4 Photos of the moon simulator with large diameter and its full moon

#### 3.1 准确度调整模块设计

辐亮度和均匀度作为两个非常重要的指标,是准确度调整中需重点考虑的部分.利用 Matlab 软件编写准确度调整模块,主要由初始化与自检模块、固定月相选择模块、灯阵坐标计算模块、灯阵亮度设定模块、灯阵亮度修正模块等组成,软件流程如图 5.

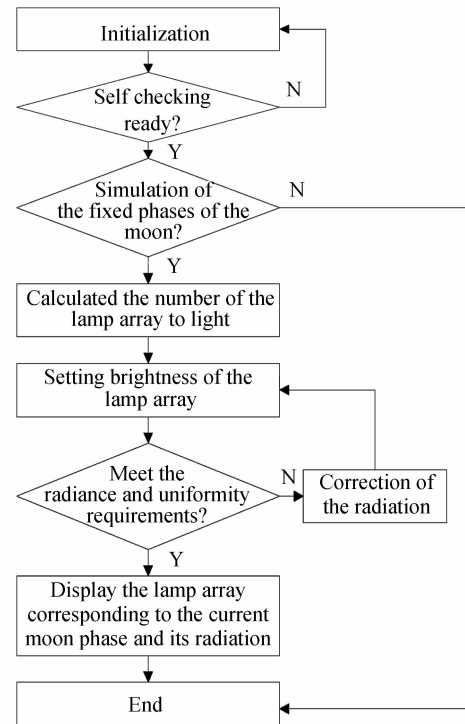


图 5 月相目标与月球亮度控制软件流程

Fig. 5 Flow chat of the control software for the phases and radiation of the moon

#### 3.2 均匀度修正

根据多点可控月相模拟矩阵式 LED 的排布方式,在有效辐照面积  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  内,选取 121 个采样点<sup>[15]</sup>,如图 6.图中,圆形区域内为大口径月球模拟器的有效辐照面积,阵列排布的  $11 \times 11$  个采样点为有效辐照面积的外接正方形.每个采样点代表一组 LED 组

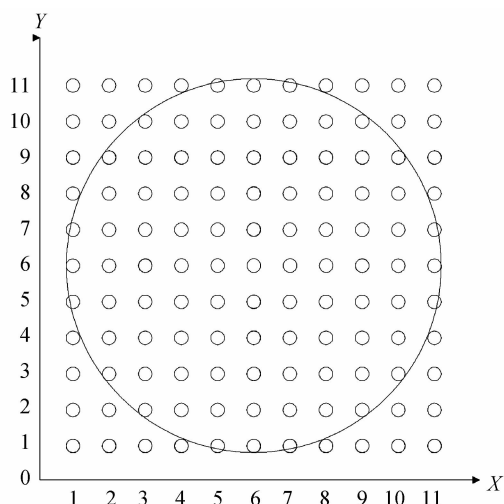


图 6 大口径月球模拟器有效辐照面积内采样点分布示意图  
Fig. 6 Sampling points of the effective area of irradiation

元,由3×3个LED构成。  
根据指标要求在距匀光板1m处,利用辐亮度计对121个采样点进行测试.考虑到辐亮度计的接收角度为2°,则辐亮度计的单次取样面积为95mm<sup>2</sup>,与LED组元的面积相似,故认为辐亮度计可完整测得模拟器的LED组元辐射情况.利用辐亮度计的测试数据,画出测试结果图,如图7.图中,辐亮度最大值为

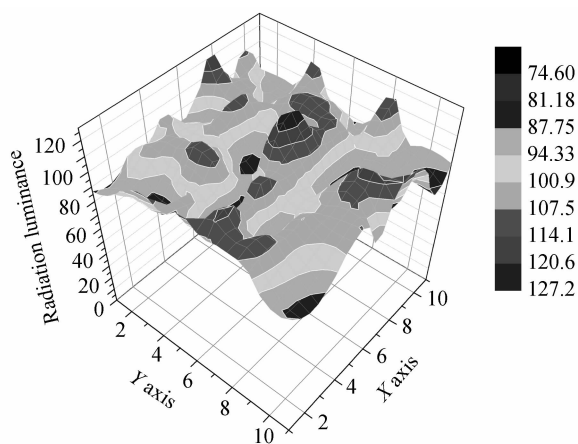


图 7 未经修正的11×11个采样点的辐亮度值  
Fig. 7 Radiation luminance of the 11×11 sampling points before correction

125 W/sr·m<sup>2</sup>,最小值为77 W/sr·m<sup>2</sup>,利用式(1)计算均匀度为23.8%,不满足技术指标要求.

分析造成均匀度超差的主要因素为LED组元中,不同LED的发光强度不同,而发光强度主要由电流控制,在一定范围内,辐亮度和电流呈线性变化.故可以通过连续改变电流实现不同位置的辐亮度值变化,进而实现均匀度的修正.

首先将11×11个采样点的修正目标值定为100 W/sr·m<sup>2</sup>;然后,根据不同采样点的修正量进行电流修正,并通过变化趋势,结合采样点的X轴和Y轴位置,拟合修正多项式,以X=1,Y∈[1,11]为例,表

2所示为未经修正的11个采样点的辐亮度值,根据表中数据给出该列的多项式拟合方程为

$$y = 5.47 \times 10^2 - 1.35 \times 10^3 x + 1.31 \times 10^3 x^2 - 6.46 \times 10^2 x^3 + 1.81 \times 10^2 x^4 - 29.8 x^5 + 2.85 x^6 - 0.15 x^7 + 0.01 x \quad (2)$$

式中,X表示LED的辐亮度修正值;Y表示辐亮度修正函数.

表 2 未经修正的11个采样点的辐亮度值  
Table 2 Radiation luminance of the 11 sampling points before correction

Coordinates of the sampling point(X axis)	Coordinates of the sampling point(Y axis)	Radiation (W/sr·m <sup>2</sup> )	Correction (W/sr·m <sup>2</sup> )
1	1	87	13
1	2	84	16
1	3	94	6
1	4	93	7
1	5	103	-3
1	6	92	8
1	7	103	-3
1	8	121	-21
1	9	94	6
1	10	110	-10
1	11	91	9

同理可拟合出其余的10个多项式拟合方程;最后,将拟合的多项式方程写入灯阵亮度修正模块,并利用Avantes-1型辐亮度计测试11×11个采样点,得到辐亮度值如图8.

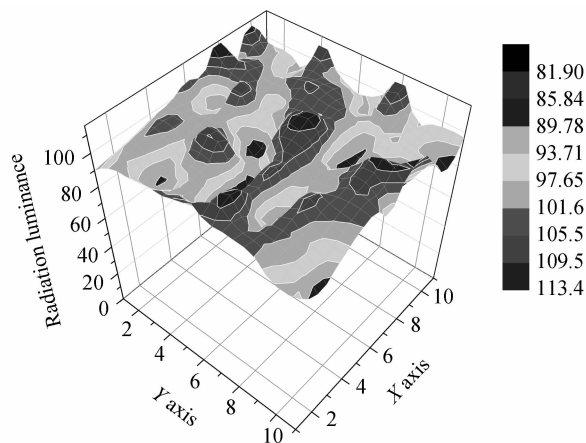


图 8 修正后的11×11个采样点的辐亮度值  
Fig. 8 Radiation luminance of the 11×11 sampling points after correction

图8中,辐亮度最大值为114 W/sr·m<sup>2</sup>,最小亮度值为89 W/sr·m<sup>2</sup>,利用式(1)计算均匀度为15.7%.为了保证数据覆盖的有效性,在有效辐照面内选取内接正方形的11×11个采样点进行辐亮度测试,其中,辐亮度最大值为114 W/sr·m<sup>2</sup>,最小亮度值为89 W/sr·m<sup>2</sup>,利用式(1)计算均匀度为12.3%,满足技术指

标要求.

## 4 结论

本文从月球传感器和导航传感器的观测需求出发,设计了一种有效辐照面积为  $\Phi 2\ 000\ \text{mm}$  且均匀度优于 15.7% 的月球模拟器. 首先,利用照明分析软件 LightTools 通过建模与追迹的方法对模拟器的月相、辐亮度和均匀度进行设计、仿真和分析;然后,设计月相目标与月球亮度控制系统,对 14 种典型月相及其辐亮度进行实时控制;最后,提出 LED 灯阵的辐亮度修正方法提高系统均匀性. 测试结果表明:该模拟器的均匀度优于 15.7%,可以作为月球观测目标供敏感器识别.

### 参考文献

- [1] CHEN Jun-yong, ZHANG Chuan-yin, DANG Ya-min. Lunar spatial exploration, surveying and mapping [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, **34**(3): 189-195.  
陈俊勇, 章传银, 党亚民. 月球航天探测和月球测绘[J]. 测绘学报, 2005, **34**(3): 189-195.
- [2] SU Shi, AN Zhi-yong, ZHANG Guo-yu, et al. The research of the moon simulator for autonomous navigation experiment [C]. 2009 China Instrument and Control Technology Conference Proceedings, 2009: 600-604.  
苏拾, 安志勇, 张国玉, 等. 自主导航试验用月亮模拟器研究[C]. 2009 中国仪器仪表与测控技术大会论文集, 2009: 600-604.
- [3] HUANG Xin, YE Pei-jian, ZHANG Wen-ming, et al. A Small Moon UV Simulator[P]. China: CN101231168, 2008-07-30.  
黄欣, 叶培建, 张文明, 等. 一种小型紫外月球模拟器[P]. 中国: CN101231168, 2008-07-30.
- [4] YU Shuang, ZHANG Guo-yu. The optical design of the moon simulator[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2010, (3): 51-52.  
于爽, 张国玉. 红外月球模拟器光学系统设计[J]. 装备制造技术, 2010, (3): 51-52.
- [5] LIU Qin, LIU Qi-neng. Power function fitting methods of light spot divergence characteristics of led square array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0422004.  
刘沁, 刘启能. 方形 LED 阵列光斑发散特性的幂函数拟合[J]. 光子学报, 2015, **44**(4): 0422004.
- [6] LUO Yong-jun, MOU Tong-sheng. Design of a weighted radiance of the LED measuring system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1496-1500.  
罗勇军, 牟同升. 基于成像方法 LED 有效辐亮度测量系统设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1496-1500.
- [7] YANG Lin, DONG Xiao-peng, HONG Long-long. Measurement and research on the luminescence characteristics of AC-LED[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, **35**(11): 108-111.  
杨玲, 董小鹏, 洪龙龙. 交流 LED 发光特性的测量与研究[J]. 电子测量技术, 2012, **35**(11): 108-111.
- [8] MENG Xiang-xiang, LIU Wei-qi, FENG Rui, et al. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**: 0822003.  
孟祥翔, 刘伟奇, 冯睿, 等. 双自由曲面 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, **43**: 0822003.
- [9] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 131-132.
- [10] FANG Jing-lu, NIU Ping-juan, TIAN Hui-juan. The influence on characteristics parameters for white-LED with current[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, **28**(s2): 234-238.  
方晶璐, 牛萍娟, 田会娟. 电流对 LED 特性参数的影响[J]. 电工技术学报, 2013, **28**(s2): 234-238.
- [11] JIANG Tian-tan. Development trends of LED characteristic and LED driver power[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2011, **22**(3): 58-60.  
蒋天堂. LED 的特性及驱动电源的发展趋势. 照明工程学报, 2011, **22**(3): 58-60.
- [12] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUA Zhi-hua, et al. Illuminative uniformity design of a LED illumination system [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 74-76.  
吴仍茂, 屠大维, 黄志华, 等. LED 照明系统的光照均匀性设计[J]. 光学技术, 2009, **35**(1): 74-76.
- [13] SCHNABLE J G M, GROCHOWSKI P J, WILHELM L. Portable LED-Array VIS-NIR spectrophotometer/nephelometer [J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1998, **2**(1): 21-28.
- [14] MALINEN J, KANSAKOSKI M R, EDDISON C G. LED-Based NIR spectrometer module for hand-held and progress analyzer applications[J]. *Sensor and Actuators B*, 1998, **51**(1-3): 220-224.
- [15] ZHENG Xiao-dong, WANG Yang-chun, QIN Wen-hong. Random error analysis of illumination distribution calculated by non-sequential ray tracing programs[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1970-1974.  
郑晓东, 汪扬春, 秦文红. 非序列光线追迹程序照度分布计算的随机误差分析[J]. 光子学报, 2008, **37**(10): 1970-1974.