

doi: 10.3788/gzxb20164501.0112004

# 太阳辐射观测仪余弦误差修正方法

郑茹<sup>1</sup>, 张国玉<sup>1,2</sup>, 高越<sup>3</sup>, 杨礼艳<sup>1</sup>, 徐毅刚<sup>4</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

(3 中国北车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

(4 江苏省无线电科学研究所有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 为了提高太阳辐射观测仪测量准确度, 针对余弦校正器自身漫射特性和菲涅耳反射引起的余弦误差, 研究了不同安装形式、不同结构下修正余弦误差的方法。结合太阳辐射特性和余弦误差的产生因素, 提出了余弦校正器外露、余弦器外露配合挡光环两种安装形式下的余弦误差修正方法, 以及余弦校正器、积分腔两种结构形式下的余弦误差修正方法。根据太阳辐射观测仪的使用要求, 利用 TracePro 对不同安装方式下的余弦误差进行建模仿真, 利用高准直性太阳模拟器配合转台和转臂模拟不同方向的准直太阳光, 并实测余弦误差。实测结果表明, 余弦器外露配合挡光环形式下, 入射角小于 $\pm 80^\circ$ , 余弦误差可优于 $\pm 6\%$ 。该修正方法可有效地减小太阳辐射光大入射角情况下的余弦误差, 提高太阳辐射观测准确度。

**关键词:** 太阳辐射观测仪; 余弦误差修正; 仿真分析; 余弦校正器; 菲涅耳反射

中图分类号: V524.7; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0112004-6

## Cosine Error Correction of Solar Radiation Observation Instrument

ZHENG Ru<sup>1</sup>, ZHANG Guo-yu<sup>1,2</sup>, GAO Yue<sup>3</sup>, YANG Li-yan<sup>1</sup>, XU Yi-gang<sup>4</sup>

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

(2 Key Laboratory of Photoelectric Measurement & Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun 130022, China)

(3 Changchun Railway Vehicles Co., LTD Changchun 130062, China)

(4 Jiangsu Radio Scientific Institute Co., LTD, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

**Abstract:** In order to improve measurement accuracy of solar radiation observation instrument, aiming at cosine error caused by characteristics of diffusion and Fresnel diffraction, a method of correcting cosine in case of different installation forms and different structures was researched. Considering the solar radiation characteristics and cosine corrector production factor, cosine error correction method was proposed in installation forms of cosine error exposed and cosine error exposed cooperating stop ring, while the method in two structures of cosine corrector and integral cavity was proposed. According to the requirements, cosine error was modulated and simulated by different installation methods by TracePro software. Using high collimation solar simulator, turntable and rotating arm, different directions sunlight were simulated, and the cosine error was measured. The results show that in the installation forms of cosine error exposed cooperating stop ring, the incident angle is less than  $\pm 80^\circ$ , the cosine error is better than 6%. The correction method can reduce cosine error effectively with the condition of large incident angle, and improve the accuracy of solar radiation observation.

**Key words:** Solar radiation observation instrument; Cosine error correction; Simulation analysis; Cosine

基金项目: 国家公益性行业科研专项 (No. GYHY201406037) 资助

第一作者: 郑茹(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为航天器地面标定与检测. Email: zhengrupp@126.com

导师(通讯作者): 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器和检测技术. Email: zh\_guoyu@163.com

收稿日期: 2015-05-14; 录用日期: 2015-07-14

http://www.photon.ac.cn

corrector; Fresnel reflection

OCIS Codes: 120.0120;120.5630;120.4640;120.4570

## 0 引言

太阳辐射观测仪用于地表全天候实时观测太阳辐射光的辐照度情况,长期工作于户外环境并输出太阳辐射光各时刻辐照度-波长-时间的三维观测数据,主要应用于气象辐射观测、太阳能资源评估、大气成分与污染监测、现代农业和生命科学等领域.太阳能产业发展及全球气候变化对太阳辐射精细化观测提出新的要求,提高太阳辐照度测试准确度已成为实现太阳辐射精细化观测的重要研究内容<sup>[1-3]</sup>.

太阳辐射观测仪主要由余弦校正器、光纤、分光系统和 CCD 探测器等组成,测试准确度主要受灵敏度和电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)输出电压的影响,其中灵敏度准确度依赖于量值传递准确度,优化空间较小<sup>[4]</sup>,而 CCD 输出电压的准确性取决于余弦误差,余弦误差越大,太阳辐射观测准确度越低<sup>[5-6]</sup>,余弦校正器是影响余弦误差的重要因素.中国计量科学研究院利用紫外光源、光阑、旋转控制平台、步进电机控制器、计算机控制系统等设备对各种紫外照度计余弦响应程度进行测试,在传统安装方式下,当入射角为 60°时,最小余弦误差为 20%<sup>[7-8]</sup>.国外最具代表性的仪器为日本 EKO 公司研制的太阳观测仪,当入射角为 0~80°时,最小余弦误差为 7%.本文结合太阳辐射特性和余弦校正器原理,分析太阳辐射测量中的余弦特性,以及影响余弦误差的重要因素,提出一种余弦误差修正方法,并通过软件仿真和实际测试验证了该修正方法的准确性.

## 1 余弦特性

### 1.1 太阳辐射特性

太阳辐射观测包含太阳辐射光的直接辐射观测和周围空间的散射辐射观测. CCD 探测结果与直接辐射的强度、方向以及散射辐射的强度及其空间分布相关,因此探测器只有准确地按照余弦定律,对各个方向上的太阳辐射光均响应,才能客观度量太阳辐射光<sup>[9]</sup>.太阳辐射测量中, CCD 探测器对太阳辐照度测试时,其测试表面应满足余弦定律,即

$$E' = \cos \theta \cdot \Phi / S = E \cdot \cos \theta \quad (1)$$

式中,  $E$  为太阳辐射光垂直入射时的辐照度,  $E'$  为太阳辐射光以  $\theta$  角入射时的辐照度<sup>[10]</sup>.

事实上, CCD 探测器不能够按照此规律完美接收所有的辐射,实际接收到的辐射能量与理论接收的辐射能量之间的差异即为余弦误差.余弦误差  $f(\theta)$  为

$$f(\theta) = \left( \frac{E'}{E \cos(\theta)} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

### 1.2 余弦校正器

余弦校正器近似于理想朗伯体,主要用于校正余弦误差,其材料多为聚四氟乙烯.太阳辐射光经余弦校正器吸收和内部折反射后,出射光再入射至 CCD 探测器的辐通量为

$$\Phi = k \frac{1-\rho}{\pi} E \cos \theta \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为余弦校正器能量损耗率,  $k$  为常数,其值与 CCD 探测器面积、余弦校正器发光面积和 CCD 与余弦校正器之间的距离有关<sup>[10]</sup>.

由式(3)可知, CCD 接收的余弦校正器出射光均满足余弦关系,若 CCD 探测器与余弦校正器之间发生倾斜或偏心,则  $k$  值发生改变,但不影响余弦响应情况.当太阳辐射观测仪机械结构设计完成后,可理论计算  $k$  值,余弦校正器与 CCD 探测器只需保证固定的位置即可.由于漫透射材料漫射特性的限制,以及漫透射性能与透过率之间的矛盾,余弦校正器往往残留着较大的校正残差,进一步减小校正残差是修正余弦误差的主要目的.

## 2 余弦误差修正

减小校正残差并提高余弦响应特性的关键是补偿太阳辐射光线以较大入射角入射余弦校正器时,菲涅尔反射带来的校正残差,其次需要提高漫射效率.其中,菲涅尔反射公式为

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (4)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \quad (5)$$

式中,  $n_1$ 、 $n_2$  为两种介质的折射率,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为入射角和折射角<sup>[12]</sup>.

对于太阳辐射观测仪来说,太阳辐射光入射到余弦校正器的入射角度变化范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ .传统形式的余弦校正器安装形式如图 1(a),太阳辐射光照射到余弦校正器发生菲涅尔反射和漫透射,最终探测器感应面接收光信号.余弦校正器的感光面与安装结构上表面位于同一水平面,接收不同入射角度的太阳辐射光,随着入射角度增大,余弦误差也随之增大.

为了弥补菲涅尔反射造成的损失,需补偿大入射角时入射光能量,若将部分余弦校正器暴露于安装结构以外,如图 1(b),暴露部分的余弦校正器其侧面在斜入射的辐射之中,从而引入大角度入射时额外的入射辐射能量,进而弥补因菲涅尔反射造成的损失.但是,当入射角为  $\pm 90^\circ$  时,理论上光电探测器感应到的辐射能量为零,图 1(b)所示安装形式下,入射角为  $\pm$

90°时,其探测器辐射能量不为零,为了保证90°入射时辐射为零,在基于原有形式的基础上,加入挡光环,即余弦校正器安装结构最上边缘与余弦校正器位于同一平面,如图1(c),此时,在保证辐射光90°入射时辐射能量为零的同时还能对大角度入射光辐射起弥补作用。

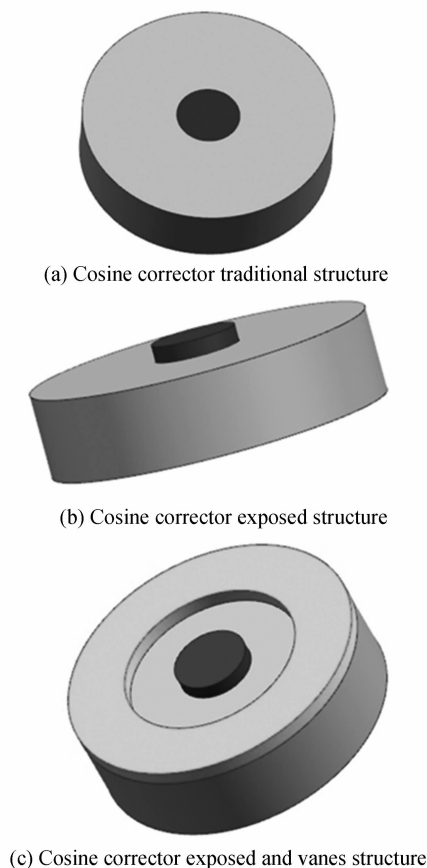


图1 余弦校正器结构设计图

Fig. 1 Cosine corrector structure design

提高漫射效率可提高光线入射到余弦校正器后出射光的均匀程度,出射光越均匀,其光学特性越近似理想朗伯体,余弦误差越小.由于太阳辐射观测仪结构尺寸上的限制,其漫射器件不适宜采用积分球,只能优化观测仪内部的漫射效率.在太阳辐射观测仪中,余弦校正器与探测器感应面之间的光线传播方式是优化余弦误差的关键,将余弦校正器与探测器感应面之间的安装结构加入积分腔,太阳辐射光在积分腔中再次发生漫反射,使其更近似理想朗伯体,同时隔绝外界环境对探测器接收信号的影响,可进一步减小余弦误差.但是,漫射积分腔会影响太阳辐射光的透过率,积分腔越大,辐射总能量的透过率越低,若系统对能量透过率要求较高,则可从优选择优化形式。

### 3 余弦误差仿真与测试

利用 TracePro 软件模拟仿真光线传播路径,并配合高准直性太阳模拟器、转台和转臂对余弦误差测试.太阳辐射观测时,天气情况实时发生变化,因此对能量

要求较高,减小余弦误差方案不采用加积分腔形式。

#### 3.1 余弦误差仿真

利用 TracePro 软件对不同安装形式的余弦校正器建模仿真<sup>[13-14]</sup>.由于 TracePro 材料库中没有聚四氟乙烯相关参量,建模前首先对聚四氟乙烯材料进行创建,即创建余弦校正器表面菲涅耳反射的边界条件.结合式(4)和(5)分别计算入射角0~90°时菲涅耳反射系数并载入仿真模型.为了防止余弦校正器漫射引起的杂散光线扰乱仿真结果,仿真系统中加入光学特性为完全吸收的杯状遮光罩,其三种安装形式几何模型如图2.图2(a)为余弦校正器传统安装形式,即余弦校正器上表面与入射表面处于同一水平面;图2(b)为余弦校正器外露安装形式,即余弦校正器上表面外露1 mm;图2(c)为余弦校正器外露加挡光环安装形式,即余弦校正器上表面与遮光环上表面处于同一水平面,遮光环内直径为5 mm.

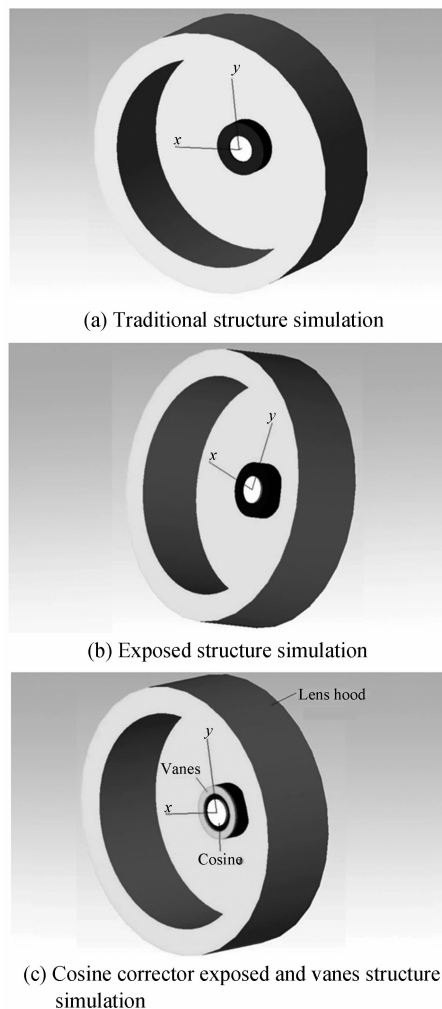
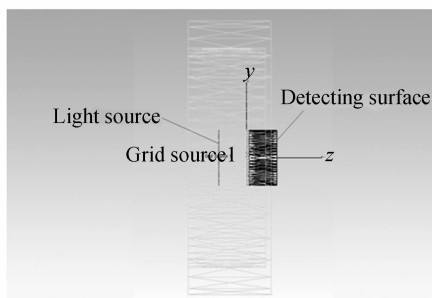


图2 余弦校正器安装结构建模

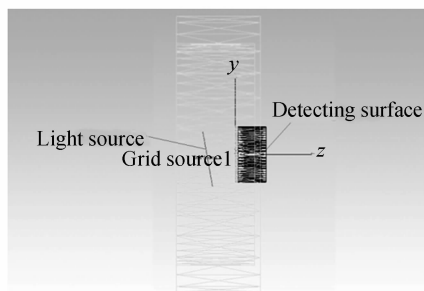
Fig. 2 Cosine corrector structure simulation

分别对三种安装形式下,光源入射角在0~±90°时的变化进行光线追迹和仿真结果分析,其光线追迹情况如图3、4.由于不同情况下光线仿真追迹图和辐

射通量分析图数量过多,光线追迹和仿真结果以余弦校正器外露加挡光环安装形式为例,当光源功率为1 W时,探测器表面入射辐照度仿真结果如图5. 根据三种安装形式下不同入射角输出的光通量,计算余弦误差如图6.



(a) Vertical incidence simulation



(b) 10° incidence simulation

图3 总体建模轮廓图  
Fig. 3 Overall structure simulation

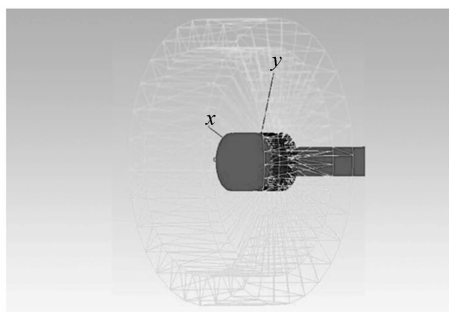
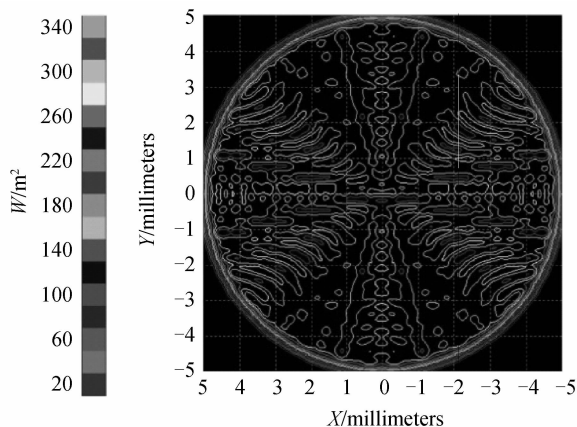


图4 光线追迹图  
Fig. 4 Ray tracing map

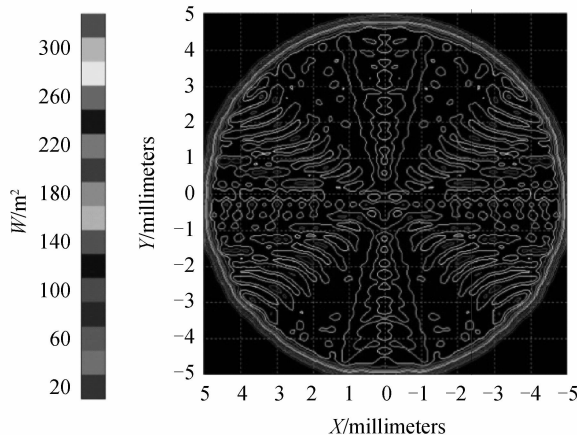
如图6,传统安装形式下的余弦校正器总体上存在负的余弦误差,误差随入射角的增加而逐渐增大,60°时余弦误差为10%,85°时约为30%;余弦校正器入射面上移后,余弦误差得到了正方向的修正,入射角在65°以内,余弦响应误差不大于2%,77°时达到10%,85°时超过40%;余弦校正器外露加挡光环后,余弦误差在75°以内小于2%,85°时误差为14%. 仿真结果表明,改变余弦校正器安装形式可有效补偿大入射角时的余弦误差,实现修正误差的目的. 太阳辐射观测仪实际装调过程中,挡光环外露量的确定采用仿真结果指导试验的方式,以边仿真边测试再改挡光环外露量的方式进行. 即通过仿真挡光环不同外露量情况下的余

弦误差,比对余弦误差,优化挡光环的外露量. 在余弦校正器外露量与挡光环外露量等高的情况下,余弦误差处于最优状态.



Total light flux:0.24677W,7351 Incident light

(a) Illumination simulation results of vertical incidence



Total light flux:0.2435W,7249 Incident light

(b) Illumination simulation results of 10° incidence

图5 照度仿真分析结果

Fig. 5 Illumination simulation results

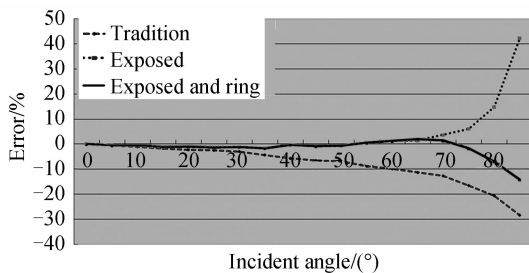


图6 余弦误差

Fig. 6 Cosine error

### 3.2 实测结果

利用高准直性太阳模拟器、转台和转臂完成余弦校正器不同安装形式下的余弦误差测试,实测照片如图7<sup>[15]</sup>. 测试中,太阳模拟器发出的准直光方向不变,转台和转臂配合旋转改变入射到余弦校正器的光线入射角,其测试数据如表1.

表 1 余弦误差实测数据  
Table 1 Test data of cosine error

| Exposed and Ring   |               |                      |                | Traditon      |                      |                |
|--------------------|---------------|----------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------|
| Incident angle/(°) | Test value/mV | Theoretical value/mV | Cosine error/% | Test value/mV | Theoretical value/mV | Cosine error/% |
| 85                 | 0.78          | 0.97                 | 20.0           | 0.59          | 0.74                 | 20.1           |
| 80                 | 2.34          | 2.22                 | 5.1            | 1.57          | 1.72                 | 8.5            |
| 70                 | 4.51          | 4.38                 | 3.0            | 3.20          | 3.39                 | 5.2            |
| 60                 | 6.48          | 6.40                 | 1.2            | 4.78          | 4.95                 | 3.4            |
| 45                 | 9.12          | 9.06                 | 0.7            | 6.88          | 7.0                  | 1.7            |
| 30                 | 11.14         | 11.09                | 0.4            | 8.51          | 8.57                 | 0.7            |
| 0                  | 12.80         | 12.81                | 0              | 9.905         | 9.90                 | 0              |
| Null point         | 0.00875       |                      |                | 0.01          |                      |                |

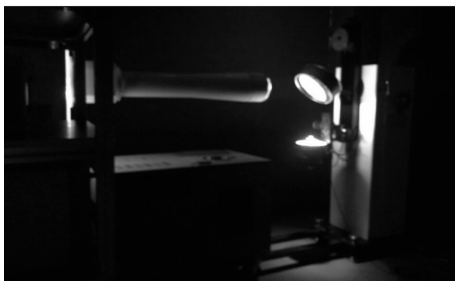


图 7 余弦误差测试现场  
Fig. 7 Cosine error test

将余弦校正器外露加挡光环和传统安装方式进行对比(即根据仿真结果中两种具有代表性的安装方式),在两种安装形式下,余弦误差修正的实测结果与仿真结果一致,与传统安装方式相比,余弦校正器外露加挡光环可减小太阳辐射观测仪的余弦误差,入射角小于 $\pm 80^\circ$ ,余弦误差优于 $\pm 6\%$ ,进而可有效提高太阳辐射观测仪的测量准确度。

## 4 结论

余弦误差是影响太阳辐射观测仪测量准确度的重要因素,本文以减小余弦误差为研究目的,结合太阳辐射特性和余弦校正器光学特性,提出一种修正方法以补偿由菲涅耳反射带来的余弦误差。通过实际测试,在传统安装方式下,入射角小于 $\pm 80^\circ$ ,余弦误差优于 $\pm 9\%$ ;在余弦校正器外露加挡光环安装方式下,入射角小于 $\pm 80^\circ$ ,余弦误差优于 $\pm 6\%$ 。实测数据表明,余弦校正器外露加挡光环安装方式可有效减小余弦误差,提高太阳辐射观测仪的测试准确度。

### 参考文献

- [1] LÜ Wen-hua, BIAN Ze-qiang, ZENG Tao. Research on calibration method of photovoltaic pyranometers [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, **35**(5): 1-5.  
吕文华,边泽强,曾涛.光电型总辐射表校准方法研究[J].电子测量技术,2012,**35**(5):1-5.
- [2] LÜ Wen-hua, MO Yue-qin, WANG Dong. Research on performance test of pyranometer [J]. *Journal of Solar Energy*, 2002, **23**(3): 313-316.

- 吕文华,莫月琴,王冬.总辐射表性能的测试研究[J].太阳能学报,2002,**23**(3):313-316.
- [3] MATEOS V, ARGIMIRO D, BILBAO S, *et al.* Empirical models of UV total radiation and cloud effect study [J]. *International Journal of Climatology*, 2010, **30**(9): 1407-1415.
- [4] BIAN Ze-qiang, XU Yi-gang, LÜ Wen-hua, *et al.* Research on influence factors of photoelectric pyranometer sensitivity calibration precision[C]. 2011: 11-18  
边泽强,徐毅刚,吕文华,等.影响光电总辐射表灵敏度标定准确度的因素探讨[C].气象水文海洋仪器学术交流会.2011: 11-18
- [5] CHENG Xi-hong, ZHANG Xiao-ling, ZHENG Xiang-dong, *et al.* Characteristics of thermal offset of a precision spectral pyranometer (PSP) and error in global solar radiation measurement[J]. *Acta Energias Solaris Sinica*, 2009, (1): 19-26.  
程兴宏,张小玲,郑向东,等. PSP 总日射表热偏移特征及其测量总辐射误差分析[J].太阳能学报,2009,(1):19-26.
- [6] SHA Yi-zhuo, BIAN Ze-qiang, LV Wen-hua. Design of solar energy resources observation station in china [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instrument*, 2010, **27**(1): 6-9.  
沙奕卓,边泽强,吕文华.我国太阳能资源观测站的设计[J].气象水文海洋仪器,2010,**27**(1):6-9.
- [7] HUANG Bo, DAI Chai-hong, YU Jia-lin. Research and test of the cosine response property of UV radiometers [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(2): 176-181  
黄勃,代彩红,于家琳.紫外辐射照度计的余弦响应特性测试研究[J].光学技术,2010,**36**(2):176-181.
- [8] DAI Cai-hong, YU Jia-lin, YU Jing. Design of cosine entrance optics for the solar ultraviolet spectral radiation measuring apparatus[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 42-46.  
代彩红,于家琳,于靖,等.太阳紫外光谱辐射地面测量装置中的入射光学系统的研制[J].光学技术,2006,**32**(1):42-46.
- [9] ZIBORD G, BULGARELLI B. Effects of cosine error in irradiance measurements from field ocean color radiometers [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5529-5538.
- [10] 王炳忠,莫月琴,杨云.现代气象辐射测量技术[M].北京:气象出版社,2008.
- [11] MA Jian-zhou. Research on measure and control technology of high way tunnel lighting[D]. Tian Jin; Tianjin University, 2006.  
马建州.高速公路隧道照明测控技术的研究[D].天津:天津大学,2006.

- [12] 郁道银. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [13] PI Jun, SHANG Kai. Normal incident invalid light of micro prism reflective sheeting based on tracepro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0423003.  
皮钧, 商开. 基于 Tracepro 的微棱镜反光膜正入射无效光分析[J]. 光子学报, 2014, **43**(4): 0423003.
- [14] SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, ZHANG Ze. Modeling and simulation of the optical scattering properties of space target based on tracePro[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1122003.
- [15] LIU Shi. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006  
刘石. 高准确度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春理工大学, 2014.