

# 弱光单星模拟器的设计与标定

刘尚阔<sup>1,2</sup>, 薛 勋<sup>1</sup>, 李 坤<sup>1</sup>, 曹 昆<sup>1</sup>, 赵建科<sup>1</sup>, 周 艳<sup>1</sup>, 姚保利<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对实验室高星等目标模拟问题,设计了一种由光源、可调光阑、积分球、光电探测器和平行光管组成的弱光单星模拟器,用于检测探测相机、星敏感器的星等探测能力。推导了光电探测器读数、积分球出口光谱辐亮度随可调光阑遮拦比的变化关系,结合星等定义公式和像面照度公式,介绍了弱光单星模拟器的工作原理,解决了高星等目标的标定难题。理论分析了弱光单星模拟器的星等模拟范围及精度,结果表明其最高可模拟 19.5 Mv 星等,精度为 11.6%;模拟低于 15 Mv 星等时,精度优于 8%。实验结果表明:实验室内,模拟星等与 KLL-04 型弱光照度计实测星等的相对误差最大为 7.09%;实验室的探测相机与天文观测的探测相机所测得的星等探测能力在 6.5 Mv 处的相对误差为 1.9%,在 15.2 Mv 处的相对误差为 2.6%。所设计弱光单星模拟器能够对高星等目标进行有效模拟。

**关键词** 测量;星模拟器;光电探测器;高星等;地面标定

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1012001

## Design and Calibration of Weak-Light Single Star Simulator

Liu Shangkuo<sup>1,2</sup>, Xue Xun<sup>1</sup>, Li Kun<sup>1</sup>, Cao Kun<sup>1</sup>, Zhao Jianke<sup>1</sup>, Zhou Yan<sup>1</sup>, Yao Baoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** Aiming at the problem of high magnitude target simulation in the lab, a weak-light single star simulator (WLSSS) consisting of light source, adjustable diaphragm, integrating sphere, photoelectric detector and collimator is developed to measure the magnitude detecting ability of detecting cameras and star sensors. The relationship between the readings of photoelectric detector, the spectral radiance in the outlet of integrating sphere and tunable obscuration ratio is deduced. Combining the magnitude definition formula and the image illuminance equation formula, the operation principle of weak-light single star simulator is introduced, and the calibration challenge of high magnitude target is solved. The magnitude simulation range and precision of WLSSS are theoretically analyzed, and results show that the highest simulating magnitude is 19.5 Mv, and the precision is 11.6%. When the simulation magnitude is lower than 15 Mv, its precision is better than 8%. Experiment results show that in the lab, the maximum relative error between simulated magnitudes and KLL-04 wide-range illuminator tested magnitudes is 7.09%. The relative error of measured magnitude detecting ability between laboratory and astro-observation detecting cameras is 1.9% in 6.5 Mv, and 2.6% in 15.2 Mv. The designed WLSSS can effectively simulate high magnitude targets.

**Key words** measurement; star simulator; photoelectric detector; high magnitude; ground calibration

**OCIS codes** 120.0280; 120.4640; 120.4800; 000.2170

## 1 引 言

星模拟器常用于模拟探测相机、星敏感器等光学系统所探测的目标,能够模拟目标的照度、光谱等指标,

收稿日期: 2017-03-28; 收到修改稿日期: 2017-05-16

作者简介: 刘尚阔(1989—),男,博士研究生,助理工程师,主要从事探测相机弱光成像性能检测方面的研究。

E-mail: liushangkuo@opt.ac.cn

导师简介: 姚保利(1968—),男,博士,研究员,主要从事超分辨显微成像技术、数字全息技术和光学微操纵技术的开发与应用等方面的研究。E-mail: yaobl@opt.ac.cn

可用于检测探测能力等关键指标。现代探测相机的典型目标为大气外反射太阳光的敌方卫星和导弹等被动目标<sup>[1]</sup>,此类目标受太阳高度角、目标反射率低、距离远等客观因素限制,其信号通常很弱,目标照度所对应的星等值高,需要考核探测相机对此类高星等目标的探测能力。同时,深空探测项目的开展促进了星等观测能力更强的星敏感器的发展,星敏感器的地面检测及标定要求星模拟器具备模拟不小于 10 Mv 目标的能力<sup>[2-3]</sup>。

目前,国内对星等探测能力的检测主要通过天文观测进行,受大气密度、透过率、天光背景等不确定因素影响,难以获得令人信服检测结果。一些学者对实验室弱光星模拟器进行了研究,针对高星等的标定问题,提出了直接法和间接法等研究方法。直接法采用基于光电倍增管的单光子计数器作为能量检测设备,最高检测星等达到了 16 Mv<sup>[4]</sup>。间接法星模拟器主要包括积分球光源和平行光管,结合连续可调光阑,在平行光管出光口处模拟目标照度,通过间接精确测量影响目标照度的各个要素,对模拟星等进行标定。间接法目前在太阳光波段实现了 14 Mv 的模拟<sup>[1]</sup>,在紫外波段的模拟能力达到了 16 Mv<sup>[5]</sup>。

针对实验室高星等目标的模拟问题,本文结合可调积分球光源、光电探测器、平行光管,采用间接法实现了更高星等目标的模拟。通过间接测量影响星等的各个因素,实现了高星等目标照度的标定,分析了星等模拟精度。在实验室,利用 KLL-04 型宽量程照度计对所设计星模拟器较低星等的模拟精度进行了标定。对比两台探测相机在实验室的星等探测能力检测结果,以及通过天文观测所获得的星等探测能力检测结果,验证了所设计弱光单星模拟器的有效性。

## 2 弱光单星模拟器构成及工作原理

### 2.1 弱光单星模拟器的构成

图 1 为弱光单星模拟器原理图,其主要由光源、可调光阑、光电探测器、积分球、平行光管等组成。光源发出的光经积分球多次反射后,在积分球出光口出射具有很好面均匀性和角均匀性的光。可调光阑位于光源前端,可对进入积分球的光通量进行连续调节。光电探测器置于积分球内壁,可实时监测积分球光源的光强变化。平行光管采用全反射光学系统,焦面位置放置星点板,平行光管内壁采用喷漆或贴黑布的方法,降低杂光。

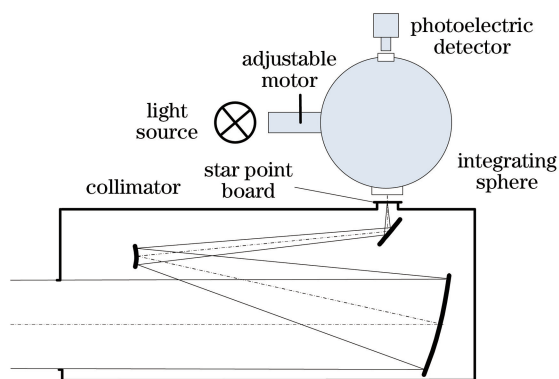


图 1 弱光单星模拟器原理图

Fig. 1 Block diagram of weak-light single star simulator

星模拟器所模拟目标的光谱,应与探测相机或星敏感器所观测真实目标的色温接近,否则,由于探测相机、星敏感器探测器对不同波长光的响应不同,色温不匹配会引起星等观测能力检测结果的误差<sup>[6]</sup>。目前,针对星模拟器的色温问题,人们提出了不同的光源方案。常规的方法为直接使用光源,如卤钨灯<sup>[1]</sup>、氙灯<sup>[7]</sup>、氙灯<sup>[5]</sup>。将积分球与多光纤耦合,设计了光纤耦合光源<sup>[8]</sup>。利用带通滤光片,将氙灯及卤钨灯光源分为多束窄带光谱,并对每一束窄带光谱的光强和光谱进行调节,实现对色温的模拟<sup>[9]</sup>。通过卤钨灯加滤光片,结合发光二极管(LED)进行色温配比<sup>[6]</sup>。以白光 LED 为基底光源,多种不同峰值波长的窄带 LED 对目标光谱进行补偿,实现了色温的连续可调<sup>[10]</sup>。

### 2.2 弱光单星模拟器的工作原理

弱光单星模拟器的工作原理为:光源经可调光阑后,进入积分球,积分球发出的光照射平行光管星点板,

在平行光管出光口处的照度可以通过光学系统能量传递公式进行计算,通过照度即可得到星模拟器所模拟的星等值,计算公式如下:

$$M - M_{\text{ref}} = -2.5 \lg(E/E_{\text{ref}}), \quad (1)$$

式中  $M_{\text{ref}}$  为参考恒星的星等值,  $E_{\text{ref}}$  为参考恒星所对应的照度,  $E$  为  $M$  等恒星的照度。通过星模拟器在平行光管出光口处的照度进行模拟,可以通过下面的像面照度公式计算:

$$E = \int \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 L(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中  $d$  为星点板直径,  $f$  为平行光管焦距,  $L$  为星点板处的光谱辐亮度,  $r$  为平行光管的反射率,  $\lambda$  为波长。

星模拟器的光源通常使用太阳光作为标准,其具有容易获得准确而稳定的计量源、最大限度地模拟探测相机工作条件下的目标特性、太阳色温附近分布的恒星数目较多(大约占恒星总数的 60%)等优点<sup>[1]</sup>。太阳光波段下的星等即视星等,其零等星的照度  $E_0 = 2.65 \times 10^{-6} \text{ lx}$ 。平行光管出光口处的照度计算公式[(2)式]需引入视见函数,如下式所示:

$$E = K_m \int_{380}^{780} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f}\right)^2 V(\lambda) L(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中  $K_m = 683 \text{ lm/W}$  为最大光谱光视效能,  $V$  为视见函数。

积分球出光口处的光谱辐亮度通常用光谱辐射度计进行标定<sup>[1,5]</sup>,但模拟高星等目标时,积分球出光口处的光谱辐亮度很弱,此时用光谱辐射度计标定,由于光信号很弱,会导致光谱辐射度计探测器需要很长的曝光时间,标定时间长,且受噪声影响,标定精度也会降低。针对这一难点,本研究设计了弱光单星模拟器,通过引入光电探测器,实现高星等目标的标定。

设光阑遮拦比为  $\alpha$  (0%~100%),光源经过光阑后的光谱强度为  $I_a(\lambda)$ ,积分球的光谱反射率为  $R(\lambda)$ ,光电探测器的光谱响应为  $Q(\lambda)$ ,则光电探测器的输出为

$$w_a = \iint I_a(\lambda) R(\lambda) Q(\lambda) d\lambda ds + \epsilon, \quad (4)$$

式中  $ds$  表示光电探测器有效探测面积内的积分,  $\epsilon$  为光电探测器的噪声。

设由光强转换为辐亮度的系数为  $k_\lambda$ ,则光阑遮拦比为  $\alpha$  时,积分球出光口处的光谱辐亮度为

$$L_a(\lambda) = k_\lambda I_a(\lambda) R(\lambda). \quad (5)$$

光阑的调整只影响光源强度的数值,而不影响光源的谱型,即不同遮拦比下的光强之间存在如下线性关系:

$$I_a(\lambda) = (1 - \alpha) I_{\alpha=0\%}(\lambda). \quad (6)$$

(4)式忽略噪声,结合(6)式,可得:

$$w_a = (1 - \alpha) w_{\alpha=0\%} \Rightarrow \alpha = 1 - w_a / w_{\alpha=0\%}. \quad (7)$$

根据(5)~(7)式,可得:

$$L_a(\lambda) = (w_a / w_{\alpha=0\%}) L_{\alpha=0\%}(\lambda). \quad (8)$$

结合(3)式及(8)式,可得:

$$E_a = (w_a / w_{\alpha=0\%}) E_{\alpha=0\%}. \quad (9)$$

利用(1)式可得:

$$M_a = -2.5 \lg(w_a / w_{\alpha=0\%}) + M_{\alpha=0\%}. \quad (10)$$

从(10)式可见,利用光阑遮拦比为 0%时的星等值及光阑遮拦比为  $\alpha$  时光电探测器的读数,即可获得光阑遮拦比为  $\alpha$  时弱光单星模拟器平行光管出光口处的星等值  $M_a$ 。由于光电探测器具有较大的动态范围,因此,通过(10)式即解决了高星等目标的模拟问题。

### 3 精度分析

根据(10)式可知:

$$\frac{\partial M_{\alpha}}{\partial w_{\alpha}} = -2.5 \frac{1}{w_{\alpha} \ln 10}, \quad \frac{\partial M_{\alpha}}{\partial w_{\alpha=0\%}} = 2.5 \frac{1}{w_{\alpha=0\%} \ln 10}, \quad \frac{\partial M_{\alpha}}{\partial M_{\alpha=0\%}} = 1, \quad (11)$$

从而可知,星等  $M_{\alpha}$  的模拟精度为

$$u_{M_{\alpha}} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{\alpha}}{\partial w_{\alpha}}\right)^2 u_{w_{\alpha}}^2 + \left(\frac{\partial M_{\alpha}}{\partial w_{\alpha=0\%}}\right)^2 u_{w_{\alpha=0\%}}^2 + \left(\frac{\partial M_{\alpha}}{\partial M_{\alpha=0\%}}\right)^2 u_{M_{\alpha=0\%}}^2}. \quad (12)$$

式中  $u_{w_{\alpha}}$  为光电探测器在遮拦比为  $\alpha$  时的读数  $w_{\alpha}$  的不确定度。

按下式计算其扩展不确定度( $k=2$ ):

$$U_{M_{\alpha}} = 2u_{M_{\alpha}}. \quad (13)$$

### 3.1 $w_{\alpha}$ 的精度

读数  $w_{\alpha}$  的精度为所采用光电探测器的探测精度。

### 3.2 $E_{\alpha=0\%}$ 的精度

(3)式中,将  $\lambda_0 = 380 \text{ nm}$  至  $\lambda_n = 780 \text{ nm}$  的波长区间  $n$  等分,记  $F(\lambda) = V(\lambda)L_{\alpha=0\%}(\lambda)r(\lambda)$ ,采用复化梯形公式计算上式中的积分<sup>[11]</sup>:

$$E_{\alpha=0\%} = \frac{\pi}{4} K_m \left(\frac{d}{f}\right)^2 \frac{\Delta\lambda}{2} \left[ F(\lambda_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} F(\lambda_i) + F(\lambda_n) \right], \quad (14)$$

式中波长间隔  $\Delta\lambda = (\lambda_n - \lambda_0)/n$ ;  $\lambda_i = \lambda_0 + i\Delta\lambda$  为第  $i$  等分处的波长值。当  $n$  值较大时,  $(\Delta\lambda)/2 [F(\lambda_0) + F(\lambda_n)]$  对积分计算结果的影响很小,因此,可以将(14)式近似为

$$E_{\alpha=0\%} = \frac{\pi}{4} K_m \left(\frac{d}{f}\right)^2 \times \Delta\lambda \sum_{i=0}^n F(\lambda_i). \quad (15)$$

(15)式对各变量微分,可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial d} &= C \frac{2d}{f^2} \sum_{i=0}^n F(\lambda_i), \quad \frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial f} = C \frac{-2d^2}{f^3} \sum_{i=0}^n F(\lambda_i), \\ \frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)} &= C \left(\frac{d}{f}\right)^2 V(\lambda_i)r(\lambda_i), \quad \frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial r(\lambda_i)} = C \left(\frac{d}{f}\right)^2 V(\lambda_i)L_{\alpha=0\%}(\lambda_i), \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $C = \pi/4K_m\Delta\lambda$  为常数项。

根据(13)式可以得出,照度  $E$  的不确定度为

$$u_{E_{\alpha=0\%}} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial d}\right)^2 u_d^2 + \left(\frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial f}\right)^2 u_f^2 + \sum_i \left\{ \left[\frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)}\right]^2 u_{L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)}^2 + \left[\frac{\partial E_{\alpha=0\%}}{\partial r(\lambda_i)}\right]^2 u_{r(\lambda_i)}^2 \right\}}, \quad (17)$$

式中  $u_d$  为星点板直径标定的不确定度,  $u_f$  为焦距标定的不确定度,  $u_{L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)}$  为波长  $\lambda_i$  处辐亮度的标定不确定度,  $u_{r(\lambda_i)}$  为波长  $\lambda_i$  处反射率的标定不确定度。  $u_{L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)}$  按下式进行计算:

$$u_{L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)} = L_{\alpha=0\%}(\lambda_i) \times \sqrt{u_{\text{rad}}^2 + u_e^2}, \quad (18)$$

式中  $L_{\alpha=0\%}(\lambda_i)$  为  $\lambda_i$  处的辐亮度标定值,  $u_{\text{rad}}$  为辐亮度测量误差,  $u_e$  为光源输出不稳定性标定值。

### 3.3 $M_{\alpha=0\%}$ 的精度

根据(1)式,有:

$$\frac{dM_{\alpha=0\%}}{dE_{\alpha=0\%}} = -2.5 \frac{1}{E_{\alpha=0\%} \ln 10}, \quad (19)$$

所以有:

$$u_{M_{\alpha=0\%}} = \left| \frac{dM_{\alpha=0\%}}{dE_{\alpha=0\%}} \right| u_{E_{\alpha=0\%}}. \quad (20)$$

### 3.4 星等 $M_{\alpha}$ 模拟精度

(12)、(17)及(18)式中,将光电探测器精度、星点直径标定精度、焦距测量精度、辐亮度测量精度、光源不稳定性以及反射率标定精度均改写为扩展不确定度形式( $k=2$ ),即:  $U_{w_{\alpha}} = 2u_{w_{\alpha}}, U_{w_{\alpha=0\%}} = 2u_{w_{\alpha=0\%}}, U_d = 2u_d, U_f = 2u_f, U_{\text{rad}} = 2u_{\text{rad}}, U_e = 2u_e, U_r = 2u_r$ 。结合(11)~(20)式,并进行整理,即可得到弱光单星模拟器的星等模拟精度:

$$U_{M_a}^2 / \left( \frac{2.5}{\ln 10} \right)^2 = \frac{1}{\omega_a^2} U_{\omega_a}^2 + \frac{1}{\omega_{a=0\%}^2} U_{\omega_a=0\%}^2 + \frac{4}{d^2} U_d^2 + \frac{4}{f^2} U_f^2 + \frac{\sum_{i=0}^n F^2(\lambda_i)}{\left[ \sum_{i=0}^n F(\lambda_i) \right]^2} (U_{\text{rad}}^2 + U_e^2) + \frac{\sum_{i=0}^n [V(\lambda_i)L(\lambda_i)U_{r(\lambda_i)}]^2}{\left[ \sum_{i=0}^n F(\lambda_i) \right]^2} \quad (21)$$

### 4 弱光单星模拟器的标定与性能测试

本研究所进行的实验采用氙灯光源,其发出的光的谱型接近太阳光。积分球为 Labsphere 积分球,直径为 200 mm,开口直径为 50 mm。光电探测器型号为 SDA-050-U-RTA-CX,其动态范围为 1 pA~20 mA,其中  $10^{-2} \sim 10^{-8}$  A 范围内的输出经校准后用于星等模拟。平行光管焦距为 5 m,配有 0.005,0.01,0.03,0.05,0.1,0.5,1 mm 共 7 个不同直径的星点板。

#### 4.1 弱光单星模拟器的标定

根据(1)、(2)及(10)式可知,进行星等标定时,需要对如下参数进行标定:1)平行光管星点板直径  $d$ ,采用三坐标进行精确标定,精度可达到  $0.2 \mu\text{m}$ ;2)平行光管焦距  $f$ ,采用精密测角法测量焦距,精度可达  $0.1\%$ ;3)积分球出光口处光谱辐亮度  $L$ ,如图 2 所示,采用 ASD FSP350-1050P 型光谱辐亮度计进行标定,精度可达  $2\%$ ,时间不稳定性优于  $2\%$ ,所采用氙灯光源在光阑全开时,积分球出光口处的光谱辐亮度标定结果如图 3 所示;4)平行光管光谱反射率  $r$ ,反射率用分光光度计进行标定,反射率的精度在  $1\%$  左右;5)光电探测器读数  $\omega_a$ ,光电探测器经校准后,其精度可达到  $5\%$ 。

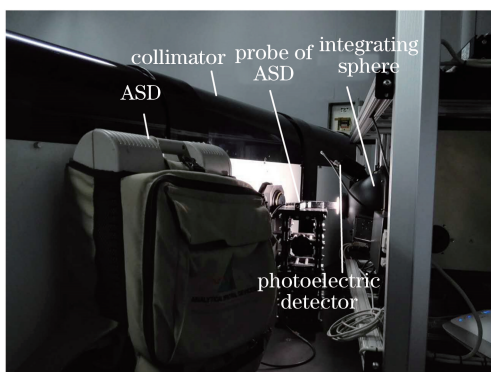


图 2 积分球出光口光谱辐亮度标定

Fig. 2 Spectral radiance calibration of the light outlet of integrating sphere

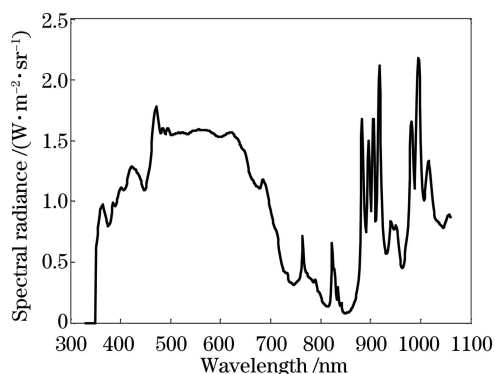


图 3 积分球出光口处光谱辐亮度

Fig. 3 Spectral radiance of the light outlet of integrating sphere

上述 1)~4)项标定完成后,利用(1)式及(12)式即可计算  $M_{a=0\%}$ ,设  $\omega_{a=0\%}$  为  $1 \times 10^{-2}$ ,则可以得到在光电探测器动态范围内,采用不同直径的星点板时弱光单星模拟器的星等模拟范围,如图 4 所示。从图 4 可以

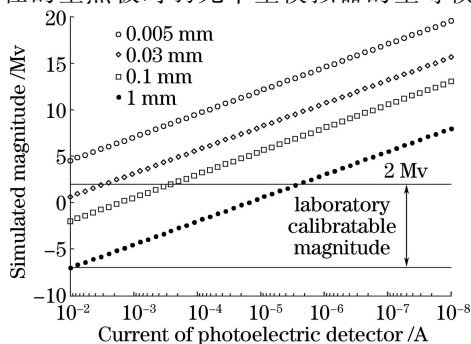


图 4 弱光单星模拟器的星等模拟范围

Fig. 4 Magnitude simulation range of the weak-light single star simulator



看出,所设计星模拟器具备模拟接近 20 Mv 目标的能力,其中低于 2 Mv 的星等可以在实验室采用弱光照度计进行直接标定,而高于 2 Mv 的星等则需要光子计数器或采用天文观测对比验证的方法进行标定。

### 4.2 星等模拟精度

根据(21)式可知:1)当星模拟器设计完成后,光电探测器的精度、光源在可调光阑遮拦比 0%时的输出值以及平行光管焦距在模拟相应星等的过程中保持不变,即(21)式中第 1、2、4~6 项不变,其值如表 1 所示,从表 1 可以看出,所设计的弱光单星模拟器的精度主要受限于光电探测器的精度;2)从图 4 可知,为模拟高星等目标,需要选用更小直径的星点板,(21)式中第 3 项将变大,不同直径星点板时,星等模拟范围、(21)式第 3 项数值以及星等模拟精度如表 2 所示。从表 2 可见,所设计星模拟器可模拟的星等达到了 19.5 Mv;星点板直径越小,其直径标定的不确定度对星等模拟精度的贡献越大,因此,星模拟器使用时,在满足检测要求的情况下,应尽量选用直径较大的星点板;在模拟高星等目标时,其不确定度约为 10%,而模拟低于 15 Mv 星等时,其精度优于 8%。

表 1 (21)式中第 1、2、4~6 项数值

Table 1 Values of the 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>, 4<sup>th</sup>–6<sup>th</sup> item in equation (21)

Value of the 1 <sup>st</sup> item	Value of the 2 <sup>nd</sup> item	Value of the 4 <sup>th</sup> item	Value of the 5 <sup>th</sup> item	Value of the 6 <sup>th</sup> item
(5%) <sup>2</sup>	(5%) <sup>2</sup>	(0.2%) <sup>2</sup>	(0.23%) <sup>2</sup>	(0.15%) <sup>2</sup>

表 2 (21)式中第 3 项数值、星等模拟范围及精度

Table 2 Values of the 3<sup>rd</sup> item in equation (21), simulated range and precision of magnitude

Diameter of star point board /mm	0.005	0.01	0.03	0.05	0.1	0.5	1
Value of the 3 <sup>rd</sup> item in equation (21)	(8%) <sup>2</sup>	(4%) <sup>2</sup>	(1.34%) <sup>2</sup>	(0.8%) <sup>2</sup>	(0.4%) <sup>2</sup>	(0.08%) <sup>2</sup>	(0.04%) <sup>2</sup>
Magnitude simulation range /Mv	4.3-19.5	2.8-17.8	0.2-15.2	-1-14	-2.2-12.8	-5.7-9.3	-7.2-7.8
$U_M/\%$	11.60	8.83	7.82	7.74	7.70	7.69	7.69

### 4.3 弱光单星模拟器实验验证

#### 4.3.1 实验室验证

弱光单星模拟器标定完成后,对于其模拟的低星等照度,可以直接在平行光管出光口处采用 KLL-04 型宽量程照度计测量其照度值,如图 5 所示。

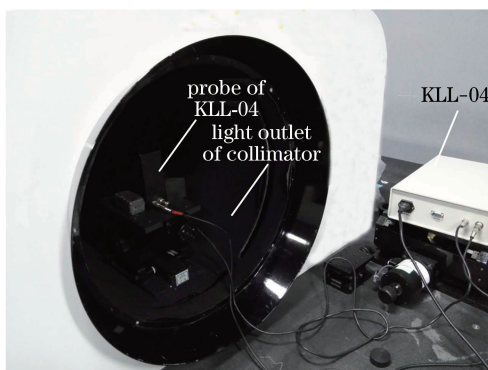


图 5 KLL-04 型宽量程照度计测量平行光管出光口照度

Fig. 5 Measuring illuminance in the light outlet of collimator by KLL-04 wide-range illuminometer

所模拟的星等根据(10)式计算,表 3 所示为采用 0.5 mm 直径星点板时,平行光管出光口处的星等实测数值。由于表 3 中-0.37 Mv 处的绝对数值接近零,因此未给出该项的相对误差。从表 3 可看出,模拟与实测星等绝对误差最大为 0.11 Mv,相对误差最大为 7.09%,小于表 2 中分析的星等模拟理论精度 7.69%,验证了星等模拟精度分析结果在低星等处的有效性。

表 3 实验室标定结果

Table 3 Result of laboratory calibration

Ample of photoelectric detector / (10 <sup>-5</sup> A)	Simulated illuminance / (10 <sup>-7</sup> lx)	Measured illuminance / (10 <sup>-7</sup> lx)	Simulated magnitude /Mv	Measured magnitude /Mv	Absolute error /Mv	Relative error /%
3490	4930	5400	-5.67	-5.77	-0.10	1.76
3470	4890	5350	-5.66	-5.76	-0.10	1.77
3390	4780	5230	-5.64	-5.74	-0.10	1.77
3240	4580	5010	-5.59	-5.69	-0.10	1.79
3020	4260	4690	-5.52	-5.62	-0.10	1.81
2700	3810	4200	-5.40	-5.50	-0.10	1.85
2300	3250	3570	-5.22	-5.32	-0.10	1.92
1830	2580	2830	-4.97	-5.07	-0.10	2.01
1330	1880	2070	-4.63	-4.73	-0.10	2.16
889	1250	1390	-4.19	-4.30	-0.11	2.63
542	764	845	-3.65	-3.76	-0.11	3.01
301	424	470	-3.01	-3.12	-0.11	3.65
152	215	238	-2.27	-2.38	-0.11	4.85
68.6	96.8	106	-1.41	-1.51	-0.10	7.09
26.5	37.4	41.1	-0.37	-0.48	-0.11	-
8.12	11.4	12.1	0.91	0.85	-0.06	6.59
3.37	4.76	4.62	1.86	1.90	0.04	2.15

4.3.2 天文观测实验验证

采用两台探测相机进行星模拟器高星等模拟精度的验证,其中一台相机的星等探测能力要求达到 6 Mv,另一台相机则要求具备探测 14 Mv 以上高星等目标的能力,两台相机探测器工作波段均为可见光。利用所设计的星模拟器,在实验室对两相机的星等探测能力进行了检测,然后在国家天文台兴隆站进行天文观测,检测其星等探测能力。相机的星等探测能力以相机所获取星点图像的均值信噪比  $\bar{R}_{SN}$  来评价,其定义如下:

$$\bar{R}_{SN} = \frac{S - N}{N_{std}}, \quad (22)$$

式中  $S$  为星点图像的灰度均值,  $N$  为星点图像的背景灰度值,  $N_{std}$  为星点图像背景的灰度均方差。探测相机对高星等目标所成星点图像如图 6 所示,相机星等探测能力即所成星点图像均值信噪比达到 5 时所观测星点对应的星等。

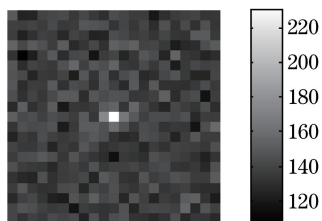


图 6 探测相机对高星等目标所成星点图像

Fig. 6 Star point image of high magnitude target imaging by detecting cameras

两相机实验室及天文观测实验的星等探测能力检测结果如表 4 所示。结果表明,两相机星等探测能力的实验室检测结果与天文观测实验检测结果的绝对误差最大为 0.4 Mv,相对误差最大为 2.6%,小于表 2 中分析的星等模拟理论精度 7.69%,验证了星等模拟精度分析结果在高星等处的有效性。

表 4 天文观测结果

Tab 4 Result of astro-observation

Camera name	Laboratory result /Mv	Astro-observation result /Mv	Absolute error /Mv	Relative error /%
Camera 1	6.5	6.38	0.12	1.9
Camera 2	15.2	14.8	0.4	2.6

## 5 结 论

根据现代探测相机及深空探测星敏传感器对高星等目标探测能力检测的要求,设计出由光源、可调光阑、积分球、光电探测器和平行光管组成的弱光单星模拟器,与已有相关设备相比具有可模拟更高星等目标、标定过程简便、星等连续可调等优点。理论分析、实验室及天文观测的结果表明:弱光单星模拟器在模拟 15 Mv 以上高星等目标时,精度约为 10%,低于 15 Mv 星等目标时的精度优于 8%,基本满足了高星等目标探测能力检测的要求。精度分析结果表明,弱光单星模拟器的星等模拟精度主要受限于光电探测器和小直径星点板的标定精度。此外,所设计星模拟器光源为氙灯光源,与实际目标的色温存在一定差异。因此,下一步工作将主要研究如何提高光电探测器和小直径星点板的标定精度,以及研究色温可调的光源。

## 参 考 文 献

- [1] Feng Guangjun, Ma Zhen, Li Yingcai. Design and performance analysis of standard starlight simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 39-42.  
冯广军, 马臻, 李英才. 一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 39-42.
- [2] Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie, *et al.* Design of star charts simulator for high-precision star simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0523001.  
孙向阳, 张国玉, 段洁, 等. 高精度星模拟器目标标准源设计[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0523001.
- [3] Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, *et al.* Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0716003.  
陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0716003.
- [4] Fu Youyu, Gan Xinji. Energy detector design of simulated star magnitude[J]. OME Information, 2010, 27(11): 90-94.  
付有余, 甘新基. 星等能量检测系统设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 90-94.
- [5] Xu Liang, Zhao Jianke, Zhou Yan, *et al.* Ddevelopment of dim light ultraviolet star simulator[J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 369-373.  
徐亮, 赵建科, 周艳, 等. 弱光紫外星模拟器的研制[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 369-373.
- [6] Liu Hongxing, Ren Jianwei, Liu Zexun, *et al.* LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 15(2): 0212003.  
刘洪兴, 任建伟, 刘则润. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. 光学学报, 2015, 15(2): 0212003.
- [7] Zhang Jie, Zhang Tao, Xiao Peng. Opto-mechanical system of single-star simulator with multi-color temperature and multi-magnitude output[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 949-953.  
张杰, 张涛, 肖鹏. 多色温多星等输出的单星模拟器光机系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 949-953.
- [8] Zou Yangyang, Zhang Guoyu, Zhang Jian, *et al.* Design of fiber-coupled light source for reflective single star simulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020602.  
邹阳阳, 张国玉, 张建, 等. 反射式单星模拟器光纤耦合光源设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020602.
- [9] Ma Qiang, Zhang Tao. Single star simulator with adjustable magnitude and spectrum for calibration[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(1): 38-42.  
马强, 张涛. 星等及光谱可调的标定用单星模拟器系统设计[J]. 应用光学, 2014, 35(1): 38-42.
- [10] Li Xiaoni, Wu Cuigang, Zhao Xin, *et al.* The research of the light source for star simulator with automatic calibration and adjustable spectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 052203.  
李晓妮, 吴隼罡, 赵昕, 等. 自动标定型光谱可调星模拟器光源系统[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 052203.
- [11] Wu Boying, Wang Deming, Ding Xiaohua, *et al.* Principle of numerical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2003.  
吴勃英, 王德明, 丁效华, 等. 数值分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.