

星模拟器多星等模拟方法研究

张晓娟¹, 张健², 杨俊杰², 张丽娜², 张建良³

(1. 吉林电子信息职业技术学院, 吉林 吉林 132000; 2. 长春理工大学, 吉林 长春 130000; 3. 空军航空大学, 吉林 长春 130000)

摘 要:根据星模拟器对真实星等模拟的需求,结合星模拟器工作原理,优化设计了一种高成像质量星模拟器光学系统;建立了星等能量计算模型,实现了星等能量的理论计算;提出一种两片线性渐变密度滤光片组合的多星等模拟方案,实现了多星等能量的高精度连续调节;软件仿真结果验证-2~6等星星等模拟误差均小于 $\pm 10\%$,满足真实星等的模拟要求,为星模拟器的真实星等模拟提供一种设计思路。

关键词:星模拟器;准直光学系统;星等模拟;线性渐变密度滤光片

中图分类号:V216.8 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.016

Research on multiple star magnitude simulation of star simulator

ZHANG Xiao-juan¹, ZHANG Jian², YANG Jun-jie², ZHANG Li-na², ZHANG Jian-liang³

(1. Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132000, China; 2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China; 3. Aviation University of Air Force, Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the requirement of star simulator for multiple star magnitude, a kind of high imaging quality star simulator optical system was optimized and designed according to the working principle of star simulator. The energy calculation model of the star magnitude was established to realize the theoretical calculation of the energy of the star magnitude. In order to realize the high precision and continuous adjustment of multiple star magnitude, a simulation method of multiple star magnitude with two pieces of linear variable filter was proposed. The simulation results show that the simulation errors range from -2 to 6 star magnitude are less than $\pm 10\%$, which meets the simulation requirements of real magnitude. It provides a design idea for the real star magnitude simulation of star simulator.

Key words: star simulator; collimation optical system; star magnitude simulation; linear variable filter

1 引言

星敏传感器是卫星姿态控制的三大核心器件(太阳敏传感器、地球敏传感器和星敏传感器)之一,其性能的好坏将直接决定卫星变轨的精确程度,是卫星变轨控制的根本保证。星模拟器作为星敏传感器的地面标定设备^[1],是航天器地面模拟标定的热点研究方向。星模拟器根据星点模拟情况的不同分为静态星模拟器和动态星模拟器,其中动态星模拟器能够实现星图实时连续变化,主要用于星敏传感器的功能测

试^[2],静态星模拟器具有较高的模拟精度,但星图显示单一,主要用于星敏传感器的精度测试^[3]。常规星模拟器的研究主要集中在对其模拟精度的研究^[4-6]。近年来随着星敏传感器技术的发展,星模拟器技术逐渐过渡至对目标恒星的真实辐射特性即恒星光谱与真实星等的模拟,其中张晓娟^[7]等提出了一种基于氙灯和卤钨灯混合光源的星模拟器光谱模拟方案,实现了多种色温光谱的模拟;刘洪兴^[8]等设计了一种基于LED的多色温多星等单星模拟器,实

基金项目:吉林省“十三五”科学技术项目(No. 吉教科合字2016第160号)资助。

作者简介:张晓娟(1970-),女,博士,教授,主要研究方向为仪器科学技术。E-mail:jlxxj2008@126.com

收稿日期:2018-01-16

现 0 等星 4000 K 和 3 等星 7000 K 星光的光谱匹配误差分别为 4.87% 和 7.83%;赵明强^[9]等利用滤光片、宽光谱光源和衰减片组设计了一种带闭环控制的单星模拟器,实现了多星等的调节;潘平^[10]提出了一种数字式光源星模拟器的设计方法;高兴华^[11]等利用基于脉冲宽度调制信号调节的 LED 可变目标光源实现了 0~7 等星控制。

本文结合星模拟器发展趋势,优化设计了星模拟器光学系统,研究星等模拟技术与控制方法,实现星模拟器的多星等连续可调和精细控制,为实现真实星等的提供一种模拟思路。

2 星模拟器光学系统优化设计

由于恒星具有极小的视张角,在恒星中对地球辐射张角最大的张角为 λ ,张角最小的也小于 T ,故恒星可看作是无穷远处的点光源^[12],因此星模拟器采用准直光学系统实现宇宙无穷远恒星辐射。

2.1 系统参数与初始结构分析选取

2.1.1 系统参数

为了更好地保证模拟星图的视场内所有星像点能够位置准确、星等不变,要求准直光学系统的成像质量具有小场曲、小畸变等特质。同时星模拟器与星敏感器配合使用时,为了提升能量利用效率,要求其光学系统的出瞳与星敏感器的入瞳能够重合,由于星敏感器一般为入瞳内置光学系统,因此将星模拟器光学系统设计出瞳外置。同时星模拟器与星敏感器二者的视场应保持一致。

结合本系统的使用情况,光学系统参数如表 1 所示。

表 1 准直光学系统主要参数

Tab. 1 Collimating optical system main parameters

技术指标	指标要求
有效视场	$3^\circ \times 3^\circ$
焦距	(1000 ± 10) mm
光谱范围	0.35 ~ 0.9 μm
出瞳直径	$\Phi 100$ mm
出瞳距离	500 mm
出射光平行度误差	中心视场 $< 1'' (1\sigma)$
	0.7 视场 $< 2.5'' (1\sigma)$

2.1.2 初始结构

星模拟器的主要结构分为反射式结构、透射式结构。反射式结构的优点是不容易产生色差,容易

被制成大孔径,不受二级光谱问题的困扰,但是对轴外像差进行校正时会对中间的一部分光产生遮挡,校正相对困难,同时随着相对孔径和视场的增大,成像质量也会降低。当系统的遮拦比为 1:4,且金属表面的反射比为 100% 的条件下,所得到的最高能量透过率 75%,对微、弱光光源系统能量利用率影响较大。透射式结构的特点是将透镜按顺序排列在光路上呈直通式结构,对镜片表面进行镀膜(单片透过率可以达到 99.95%)即可有效提高系统的光能透过率,因此选用透射式准直系统。

由于星模拟器成像位置精度主要取决于系统的畸变量,且畸变值只受视场影响,即不同视场的畸变值不同。初级畸变的表达式为:

$$\delta y'_z = -\frac{1}{2n'_k u'_k} \sum_1^k S_v \quad (1)$$

$$S_v = l_z u_z n i (i_z - i'_z) (i'_z - u_z) + J(u_z^2 - u'^2_z) \quad (2)$$

由式(2)可知,产生畸变的原因有两个,一是光阑位置的正弦差,二是角倍率。所以,若要消除畸变,应同时满足式(3)、式(4):

$$n y_z \sin U_z = n' y'_z \sin U'_z \quad (3)$$

$$n y_z \tan U_z = n' y'_z \tan U'_z \quad (4)$$

显然对于畸变的校正非常困难,只能尽量使其值较小以达到设计指标的要求。

能量中心与主光线位置偏差也是造成星点位置误差的一个主要原因。实际光学系统中由于像差的存在,导致一个物点发出的光线不再与像面上的理想像点重合,而是在该点附近形成一个弥散的光斑,即成像点的能量中心不再与主光线重合,因此设计中应尽量减小能量中心与主光线的偏差值。

由于该星模拟器光谱范围是 0.35 ~ 0.9 μm ,色散对近红外光谱的影响较为明显,由各种色光的折射率不同而产生的倍率色差会破坏轴外成像点的清晰度。如果倍率色差校正的不好,星模拟器的星点模拟精度也会受到影响,故选择合适的材料也是设计中要考虑的。

考虑到星模拟器使用过程中的温度变化,星模拟器在 10 ~ 30 $^\circ\text{C}$ 温度范围内必须具有较好的一致性。折射透镜的光热膨胀系数反映温度变化时系统焦距的归一化变化,计算公式为:

$$x_f = \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{dT} = a_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} - \frac{1}{n} \cdot \frac{dn_1}{dT} \right) \quad (5)$$

式中, a_g 为材料的热膨胀系数; n 为材料折射率; dn/dT 为材料折射率变化相对于像空间折射率的变化; n_i 为系统所在介质的折射率。通常透镜的这些影响很小, 但是对于星模拟器的高精度要求, 材料的光热特性不能被忽略。

综合考虑, 本设计采用四片式透镜结构, 为了减

小系统的光路长度, 增加平面反射镜进行光路折转。

2.2 系统像质评价

根据初始结构用 ZEMAX 光学软件进行优化设计。优化后的准直物镜光学系统结构参数如表 2 所示。优化后光学系统焦距为 1000.01 mm, 系统总长 1044.02 mm, 其光路如图 1 所示。

表 2 优化后的准直物镜光学系统结构参数

Tab. 2 Optimized collimation lens optical system structure parameters

Surf; Type		Comment	Radius		Thickness		Glass		Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity		Infinity		Infinity		
STO	Standard		Infinity		500.000000				50.000000
2	Standard		419.513934		25.600000		H-ZPK1		68.718700
3	Standard		-672.636549		18.000000				68.062508
4	Standard		-346.721765		16.200000		H-tf31		66.136837
5	Standard		676.196521		8.000000				66.002999
6	Standard		142.709494		18.000000		H-ZLAF3		67.096887
7	Standard		133.799676		31.000000				63.498766
8	Standard		-480.628972		27.300000		H-LAK7		64.098230
9	Standard		-281.766081		700.000000				66.192602
10 +	Standard		Infinity		-185.742949		MIRROR		54.009150
11 +	Standard		Infinity		-0.317262	V			113.722066
IMA +	Standard		Infinity		—				113.825171

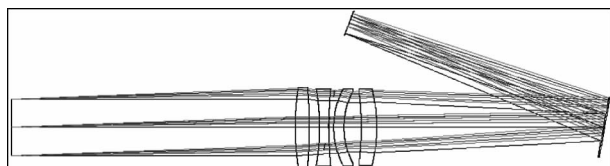


图 1 光学系统光路图

Fig. 1 Layout of optical system

优化后的球差和轴向色差、畸变和场曲、点列图、MTF 曲线和波相差如图 2~6 所示。

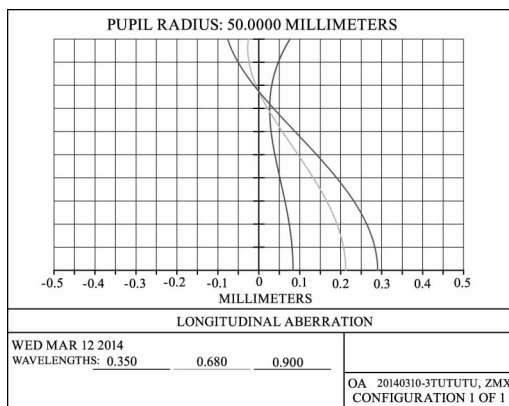


图 2 球差和轴向色差曲线图

Fig. 2 Spherical aberration and axial color difference graph

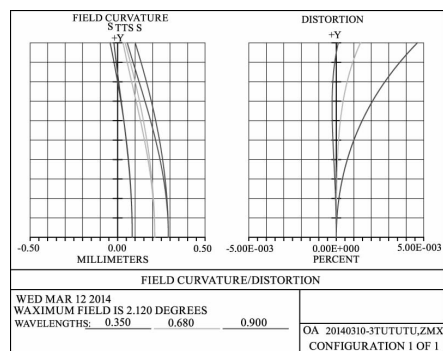


图 3 场曲、畸变曲线图

Fig. 3 Field curvature and distortion curve

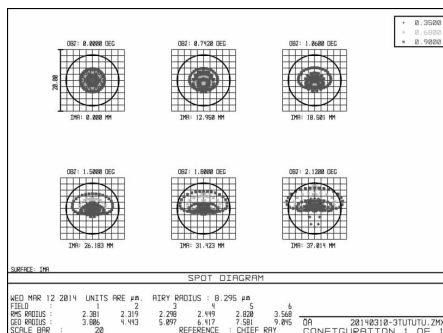


图 4 点列图

Fig. 4 Spot distribution

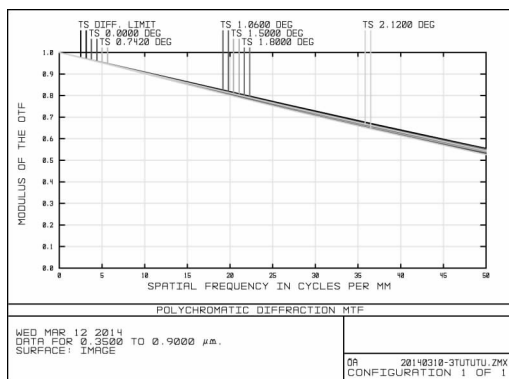


图5 MTF 曲线图

Fig. 5 MTF curve

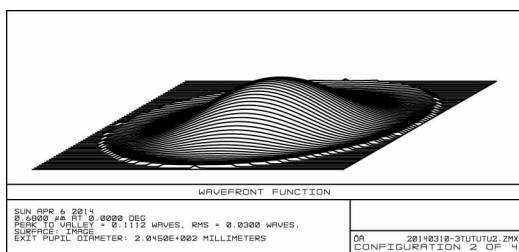


图6 波相差曲线图

Fig. 6 Wave aberration curve

从图中可以得出系统已经校正了球差,而在 0.707 视场系统对 F 光和 C 先对色差进行了校正,二级光谱较小;中心波长畸变的最大值为 0.0014%,由畸变造成的出射光准直度误差最大值为 0.0105",选取的视场艾里斑半径大于各个视场的弥散斑半径,MTF 曲线都达到衍射极限,在 50 lp/mm 处,全视场 MTF 值高于 0.5,光学系统的波相差均方根值不大于 $\lambda/200$,在全视场内波相差 PV 值满足小于等于 $\lambda/20$ 的要求,具有较好的成像质量。

3 星等模拟技术与控制方法

3.1 星等能量计算模型

由于星模拟器光学系统中的反射镜几乎不会带来能量损失,因此可以将光学系统看作一片薄透镜进行分析,计算过程中选取光学系统的最后一面的孔径作为光学系统直径。建立星等能量计算模型如图 7 所示。

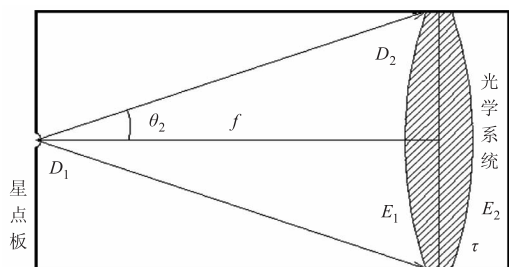


图7 星等能量计算模型

Fig. 7 Calculation model of magnitude energy

设高成像质量光学系统的透过率为 $\tau_{\text{镜}}$, E_1 为光学系统入射面的照度,则:

$$E_2 = \tau_{\text{镜}} E_1 \quad (6)$$

其中, E_2 是视星等的照度其照度范围为 $1.61 \times 10^{-5} \text{lx} \sim 1.01 \times 10^{-8} \text{lx}$ 。

设光学系统的最后一面的最大孔径 D_2 , S_2 为光学系统的入射面的面积,则:

$$S_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} \quad (7)$$

由于光学系统入射面的照度为 $E_1 = \frac{\phi_2}{S_2}$,故进入光学系统的光通量:

$$\phi_2 = E_1 \cdot S_2 \quad (8)$$

设星点光强处为 I_2 ,光学系统的焦距为 f ,光学系统的通光口径对星点的立体角为 Ω_2 ,则:

$$I_2 = \frac{\phi_2}{\Omega_2} \quad (9)$$

其中, $\Omega_2 = 2\pi(1 - \cos\theta_2)$, $\cos\theta_2 = \frac{f}{\sqrt{f^2 + \frac{D_2^2}{4}}}$ 。

光从星点射出是发光角度为 Ω_1 的均匀点光源,因此星点的全部光通量为:

$$\phi_1 = I_2 \cdot \Omega_1 \quad (10)$$

其中, $\Omega_2 \leq \Omega_1 \leq 2\pi$ 。

光源照在星点分划板上的照度应为:

$$E = \frac{\phi_1}{S_1} \quad (11)$$

其中, S_1 为星点刻划直径大小,则:

$$S_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (12)$$

根据上述计算可得到模拟 -2 等星时需要光源照在星点分划板上的照度为 1.2485 lx。-2 ~ 6 等星光照度值及其在星点分划板上的照度如表 3 所示。

表 3 各个星等的光照度值及其在星点分划板上的照度值

Tab. 3 Luminous value of each magnitude and its illumination value on the star reticle

视星等	光照度值/lx	在星点分划板上的照度/lx
-2	1.61×10^{-5}	1.2485
-1	6.43×10^{-6}	0.4970
0	2.56×10^{-6}	1.98×10^{-1}
1	1.01×10^{-6}	7.88×10^{-2}
2	4.06×10^{-7}	3.14×10^{-2}
3	1.62×10^{-7}	1.25×10^{-2}
4	6.45×10^{-8}	4.97×10^{-3}
5	2.56×10^{-8}	1.978×10^{-3}
6	1.01×10^{-8}	7.87×10^{-4}

3.2 星等模拟控制方法

目前星等模拟主要有三种方法,一是在光学系统中加多组衰减片;二是调节星模拟器光源发出光强的多少;三是通过可变光阑调整星模拟器的入射光照度。由表 2 可知星模拟器需模拟的星点分划板光照度范围为 $7.87 \times 10^{-4} \sim 1.2485 \text{ lx}$,星等的调节范围为 1586.4 倍,对光源的调节能力要求较高,通过单独对光源的调节难以实现;利用衰减片进行星等调节时,由于衰减片的透过率为衡量,导致系统的鲁棒性较差,长时间工作星等控制精度低;利用可变光阑进行会对星等能量线性调节产生一定影响。

因此结合线性渐变密度滤光片的特性^[13],提出一种两片线性渐变密度滤光片配合步进电机组合实现星等模拟初步调节和精细的模拟方案,从而实现星等能量的高精度连续可调,提升了系统的鲁棒性与可校准性。其原理公式如下:

$$E = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot E_0 \quad (13)$$

其中, E 为星点板处的照度; τ_1 为第一块线性渐变密度滤光片的透过率,范围为 100% ~ 0.1% 其作用是将能量调节至与需模拟目标能量相同数量级; τ_2 为第二块线性渐变密度滤光片的透过率,范围为 100% ~ 10%,作用实现能量的精细控制。

根据式(13)可知 -2 ~ 6 等星星等调节组合透过率有多组解,本文使用的透过率组合如表 4 所示。

表 4 星等调节组合透过率

Tab.4 Star adjusts the combined transmission

星等	组合透过率	滤光片 1 的透过率	滤光片 2 的透过率
-2	98.01%	99%	99%
-1	39.02%	45%	86.7%
0	15.53%	22.5%	69.02%
1	6.18%	11.25%	54.9%
2	2.46%	5.62%	43.8%
3	0.979%	2.81%	34.8%
4	0.388%	1.41%	27.5%
5	0.154%	0.71%	21.7%
6	0.061%	0.36%	16.9%

4 星等模拟仿真

通过 LightTools 软件验证星模拟器是能否实现 -2 Mv ~ +6 Mv 可调以及模拟星等亮度误差在 $\pm 10\%$ 以内。光学系统建模如图 8 所示。

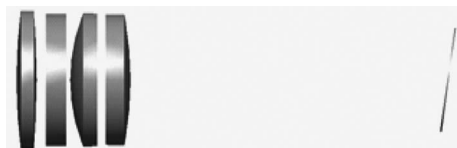


图 8 光学系统建模

Fig.8 Optical system modeling

追迹 1000000 条光线的 -2 等星等能量为 $1.7449 \times 10^{-5} \text{ lx}$,满足 -2 等星的照度要求,其追迹结果如图 9 所示。

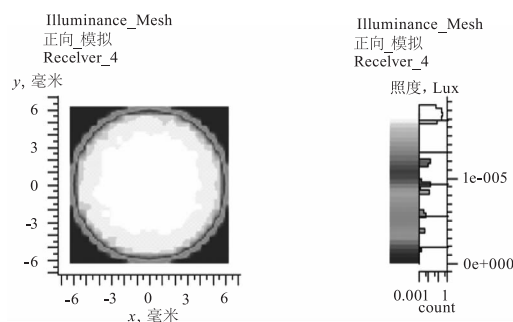


图 9 -2 等星追迹结果

Fig.9 Trace results of -2 Mv

-2 等星星等误差值为:

$$\sigma = \frac{(1.7449 - 1.61) \times 10^{-5}}{1.61 \times 10^{-5}} = 8.0\%$$

-2 ~ 6 等星星等模拟误差如表 5 所示。

表 5 星等模拟误差

Tab.5 Error of star magnitude simulation

星等	相对误差/%
-2	8
-1	-7.9
0	8.5
1	9.5
2	-9.2
3	8
4	-8.9
5	8.3
6	9.3

从表中可以看出 -2 ~ 6 等星星等模拟误差均小于 $\pm 10\%$,满足星模拟器真实星等的模拟要求。

5 结论

根据星模拟器对多星等模拟的需求,设计了一种以高成像质量准直光学系统,为星模等模拟提供良好基础;建立了星等能量计算模型,计算出星点板处所需能量;结合线性渐变密度滤光片的特性,提出一种两片线性渐变密度滤光片组合实现星等模拟初

步调节和精细的模拟方案,实现星等能量的高精度连续可调,并本文所用的透过率组合;利用软件进行仿真验证-2~6等星星等模拟误差均小于 $\pm 10\%$,满足真实星等的模拟要求。

参考文献:

- [1] CHEN Qimeng, ZHANG Guoyu, WANG Zhe, et al. Optical system design of high-precision static star simulator with large field of view[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 152-157. (in Chinese)
陈启梦, 张国玉, 王哲, 等. 大视场高精度静态星模拟器的光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 152-157.
- [2] ZHENG Ru. The optical design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
郑茹. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [3] SUN Gaofei, ZHANG Guoyu, LIU Shi, et al. Design of static star simulator and accuracy analysis[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 38(5): 26-29. (in Chinese)
孙高飞, 张国玉, 刘石, 等. 静态星模拟器设计与精度分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2015, 38(5): 26-29.
- [4] SUN Gaofei, ZHANG Guoyu, JIANG Huilin, et al. Design of very high accuracy star simulator[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1730-1735. (in Chinese)
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1730-1735.
- [5] WANG Xiaolong, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Star correction method based on the comprehensive error of star simulator[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015(2): 36-38. (in Chinese)
王小龙, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于星模拟器综合误差的星点修正方法的研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2015(2): 36-38.
- [6] ZOU Yangyang, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Star position correction of dynamic star simulator based on distortion effect[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(4): 468-473. (in Chinese)
邹阳阳, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于畸变影响的动态星模拟器星点位置修正方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 468-473.
- [7] ZHANG Xiaojuan, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Spectral study for star simulator on hybrid light source [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 222001. (in Chinese)
张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于混合光源的星模拟器光谱研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 222001.
- [8] 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, 35(2): 179-186. (in Chinese)
刘洪兴, 任建伟, 刘则润, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 179-186.
- [9] ZHAO Mingqiang, ZHANG Guoyu, ZHANG Jian, et al. The research of magnitude control for light source based on single star simulator[J]. Optical Technique, 2014, 40(5): 445-449. (in Chinese)
赵明强, 张国玉, 张健, 等. 基于单星模拟器星等控制光源的研究[J]. 光学技术, 2014, 40(5): 445-449.
- [10] PAN Ping. Single star simulator developed digital light source technology [D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, 2005. (in Chinese)
潘平. 单星模拟器数字光源研制技术[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2005.
- [11] GAO Xinghua, LI Jianyong, WANG Xia. Design of high-precision digital star magnitude simulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 247-253. (in Chinese)
高兴华, 李建永, 王霞. 高精度数字星等模拟器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 247-253.
- [12] Ouyang Mingzhao. Optical system design of transmissive high-precision star simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
欧阳名钊. 透射式高精度星模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [13] FAN Bin, LI Gangzheng, CHENG Xinbin, et al. Production and measurement of linear variable filter [J]. Optical Instruments, 2006, 28(4): 95-103. (in Chinese)
范滨, 李刚正, 程鑫彬, 等. 线性渐变滤光片的制备与测试[J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 95-103.