

大视场多星模拟器标定技术研究

李曼丽^{1,2}, 韩冰², 刘航¹, 袁理², 黄丹飞¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:应用65个无穷远目标模拟天区恒星,建立天区恒星坐标系,将J2000.0天球坐标系中恒星坐标转换成星模拟器坐标,通过计算平行光管光轴指向,设计光管安装基座,将所有平行光管按照计算结果放置于光管安装基座上,每个平行光管目标源模拟相应恒星位置。星等调节通过利用占空比调节的可调恒流驱动技术来实现,通过控制占空比,调整LED光源输出照度模拟不同恒星星等。在视场 $20^{\circ}\times 40^{\circ}$ 范围内,通过对星等和星角距的标定,恒星相对位置模拟精度优于 $2.48''$,星等误差优于 4.7% ,在 ± 1.5 Mv范围内可调。连续工作4h,模拟星的照度变化小于 6.7% ,位置精度无明显变化。

关键词:星模拟器;星等标定;坐标系转换

中图分类号: O439

文献标志码:A

文章编号:1672-9870(2020)03-0017-06

Study on Calibration Technology of Large Field of View Multi-star Simulator

LI Man-li^{1,2}, HAN Bing², LIU Hang¹, YUAN Li², HUANG Dan-fei²

(1.School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033)

Abstract: Application of 65 stars at infinity target simulation region establishment day stars area coordinate system, the J2000.0 celestial coordinate system coordinate, coordinate transformation into stars in star simulator parallel light pipe axis by calculation, design of light pipe installation pedestal, placing all of parallel light pipe according to the calculation results light pipe installation pedestal, each parallel light pipe target source simulating star position accordingly. Magnitude regulation is realized by using the adjustable constant-current drive technology of duty cycle regulation. By controlling the duty cycle, the output illumination of LED light source is adjusted to simulate the magnitude of different stars. Within the field of view of $20^{\circ}\times 40^{\circ}$, the calibration of magnitude and angular distance shows that the simulation accuracy of relative position of the star is better than $2.48''$, and the magnitude error is better than 4.7% , adjustable within ± 1.5 Mv. Working continuously for 4 hours, the illuminance change of the simulated star is less than 6.69% , with no significant change in position accuracy.

Key words: star simulator; magnitude calibration; coordinate transformation

星模拟器,一般用于提供无限远点光源作为 模拟星点,来模拟目标恒星的大小、星等、光谱

收稿日期:2019-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(11903035)

作者简介:李曼丽(1993-),女,硕士研究生, E-mail: 864159270@qq.com

通讯作者:黄丹飞(1965-),女,博士,教授, E-mail: huangd_f@163.com

特性等^[1-2]。常规星模拟器的研究主要是对其模拟精度的研究^[3-5]。近年来随着星敏传感器技术的发展,星模拟器技术更多倾向于恒星光谱与真实星等的模拟^[6],其中刘洪兴等人^[7]设计了一种0等星4000 K和3等星7000 K星光的光谱匹配误差不超过8%的多色温多星等单星模拟器;马强等人^[8]将光源分为多束窄带光谱,对每一束窄带光谱的光强和光谱进行调节实现对黑体光谱范围及色温的模拟;周建涛等人^[9]推导了色指数与接受器和恒星辐射之间的关系,用波段星等线性拟合得出星敏传感器仪器星等。白洁等人^[10]提出一种结构紧凑的透镜结构,实现了用户需求的多星模拟器的视场(25°)。张晓娟等人^[6]利用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。

本文采用65个卡塞格林式平行光管配合LED光源及星点靶来模拟天区恒星,建立天区恒星模拟器坐标系,通过坐标系转换,将指定天区的恒星的赤经、赤纬坐标转换为星模拟器坐标系,通过合理的工程设计实现模拟恒星位置。利用占空比调节的可调恒流驱动技术来实现星等调节。用微光照度计测量光管照度,将照度与占空比拟合成一条曲线,通过调节占空比达到调节所需区段的照度,从而达到模拟恒星星等的目的。

1 大视场多星模拟器的组成

大视场多星模拟器主要由平行光管组件、光管安装基座、调整基座组件和控制系统组成,如图1所示。平行光管组件通过在焦面处安装星点孔模拟无穷远目标,即恒星;光管安装基座设置不同角度光管机械安装接口,接口方向为模拟器坐标系中恒星坐标代表的方向,调整基座具有调整位置和调平功能,用于匹配不同星敏传感器;控制系统可以控制星模拟器的开关及在一定的范围内调节星等。

平行光管组件主要由平行光管主体模块、光

源模块及指向激光器模块组成,如图2所示。与透射式光管相比,卡塞格林式平行光管光路结构紧凑、重量较轻,且在保证成像质量与使用的条件下,充分提高了系统的使用效率与易用性。光管采用全铝式结构,可使模拟星一致性较好,减少装调难度,便于集成调节。且在光管前端安装指向激光器,降低了装调难度。

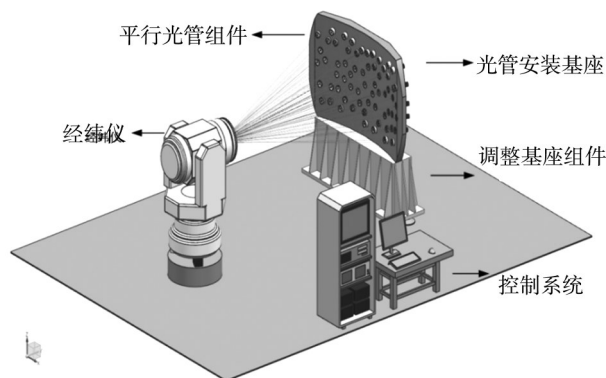


图1 大视场多星模拟器原理图



图2 平行光管组件图

光源模块选用LED作为照明光源,LED具有发光效率高、色稳定性好、使用寿命长和驱动电路简单等优点^[11],从可靠性和长期维护角度考虑,最终选择LED作为首选光源。白光LED光谱曲线如图3所示,光谱覆盖450~750 nm,中心波长为581 nm。

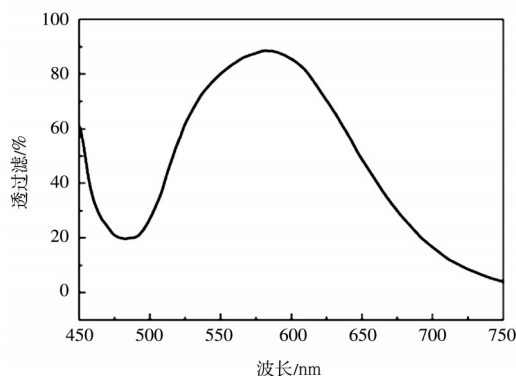


图3 白光LED光谱曲线

2 恒星坐标系计算

在天球坐标系^[12]中, 恒星的位置都是用赤经、赤纬坐标来表示的, 然而在多星模拟器中, 模拟星的位置需要在模拟器坐标系下表示, 因此, 必须进行天球坐标系转换为模拟器坐标系的坐标系变换, 将恒星的赤经、赤纬坐标转换为模拟器坐标系下的坐标, 确定各个模拟星在模拟器中的准确位置, 这样才能进行后续的设计、加工和装调等工作。

2.1 转换天球直角坐标

如图4所示, 设模拟星 S_i 的赤经为 α_i , 赤纬为 δ_i , 设天球半径为 R ($R=2\ 500\text{ mm}$), 则相应的天球直角坐标 (x_i, y_i, z_i) 按以下式子计算:

$$x_i = R \cos \delta_i \cos \alpha_i \quad (1)$$

$$y_i = R \cos \delta_i \sin \alpha_i \quad (2)$$

$$z_i = R \sin \delta_i \quad (3)$$

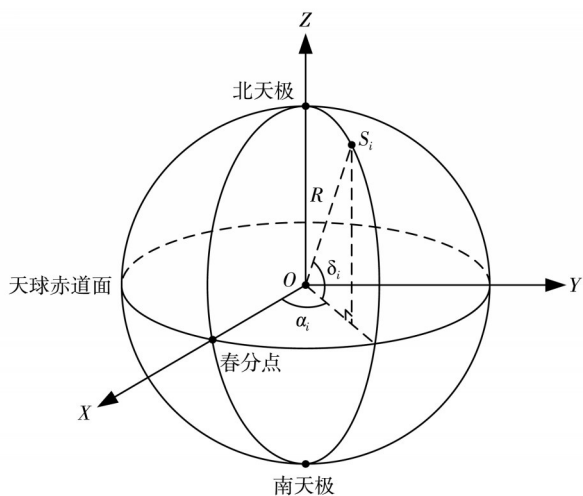


图4 模拟星 S_i 赤经 α_i 和赤纬 δ_i

2.2 坐标轴旋转过程

如图5所示, 天球坐标系为 $O-XYZ$, O_m 点表示HIP3821恒星, 其赤经为 $\alpha=12.271\ 44^\circ$, 赤纬为 $\delta=57.816\ 5^\circ$, $O_m x_m$ 指向地球中心, $O_m z_m$ 为过 O_m 点的大圆的切线。设模拟器坐标系为 $O-X''Y''Z''$, 如图6所示, O 点位于模拟球心, 现在需要将 $O-XYZ$ 坐标系进行旋转, 使其与坐标系 $O-X''Y''Z''$ 重合。设 A 点为 O_m 在天球赤道面 OXY 面上的投影, 则有 $O_m A \parallel OZ$, 所以 A 点必在平面 ZOO_m 内。坐标系 $O-XYZ$ 的旋

转分为两步进行。

首先, 将坐标系 $O-XYZ$ 绕 Z 轴旋转 β 角, 得到坐标系 $O-X'Y'Z'$ (图中未画出), 使得 OY' 轴与 OA 重合。按照右手规则, β 角应该是负值, 即:

$$\beta = -(\frac{\pi}{2} - \alpha) = \alpha - \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

相应的旋转矩阵 S_z 为:

$$S_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

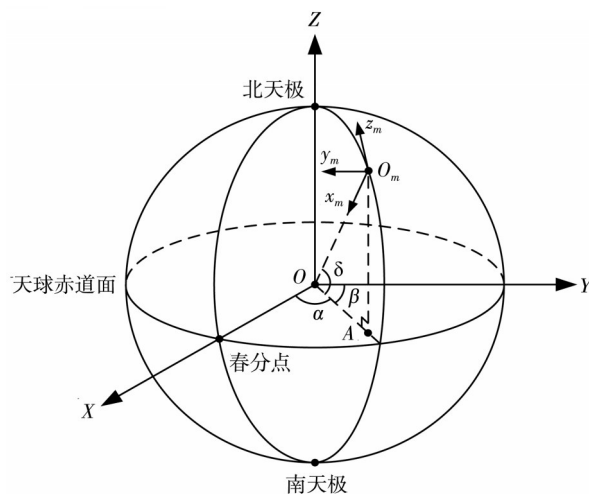


图5 坐标变换

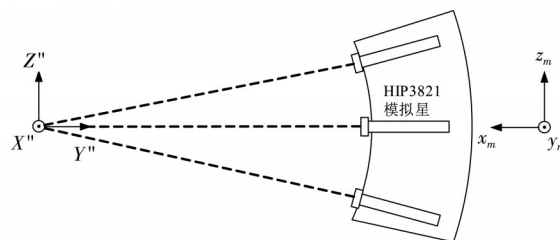


图6 $O-X''Y''Z''$ 坐标系

其次, 将坐标系 $O-X'Y'Z'$ 绕 X' 轴旋转 δ 角, 得到坐标系 $O-X''Y''Z''$, 使得 OY'' 轴与 OO_m 重合。按照右手规则, δ 角是正值。相应的旋转矩阵 S_x 为:

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过两步旋转, 实现了 OY'' 轴指向点 O_m , 并且 $OZ'' \parallel O_m z_m$, $OX'' \parallel O_m y_m$ 。

2.3 计算结果

设各个模拟星的天球直角坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 则模拟星在两次旋转后的坐标系 $O-X''Y''Z''$ 中的坐标 (x_i'', y_i'', z_i'') 按下式计算:

$$\begin{bmatrix} x_i'' \\ y_i'' \\ z_i'' \end{bmatrix} = S_x S_z \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

最终计算结果如表1所示(选取7颗星)。根据计算出的坐标值 (x_i'', y_i'', z_i'') 即可确定各个模拟星在天区恒星模拟器中的准确位置,作为设计输入,实现天区模拟架设计。

表1 坐标系转换结果

HIP号	x_i'' 坐标/mm	y_i'' 坐标/mm	z_i'' 坐标/mm
746	222.156	2 488.992	74.603
4427	-40.666	2 496.438	127.065
8886	-311.722	2 463.146	292.816
109492	838.959	2 339.251	272.127
1644	170.989	2 493.723	-45.94
8475	-435.047	2 432.031	-382.047
109017	762.689	2 340.595	435.797

通过天区坐标系相对于中心光管的位置进行转换计算,模拟天区内所有星点相对HIP3821恒星在 oy_m 轴和 oz_m 轴两个方向上的角度值,如表2所示。

表2 角度值示意图

HIP序号	偏摆角(oy_m 轴方向)/($^\circ$)	俯仰角(oz_m 轴方向)/($^\circ$)
746	-5.100 44	1.710 04
4427	0.933 25	2.913 38
8886	7.212 69	6.726 29
109492	-19.730 08	6.249 07
1644	-3.922 5	-1.052 93
8475	10.141 93	-8.790 31
109017	-18.048 33	10.039 02

3 星等标定

利用固定倍率的衰减片和LED相结合的方式实现星等调节,利用一个固定倍率衰减片和白光LED匹配出最低星等,通过调整LED恒流控制电路的占空比来调节驱动电流,从而调整LED照度输出,实现星等自动调节功能。这种方法星等模拟精度高,可精密调节步长,通过调整占空比实现自动控制,可连续调节一定范围的星等。

3.1 占空比与照度拟合

通过测量,可以得到 n 个占空比与照度相对应的数据点 (X_i, Y_i) ,其中 $i=1, 2, \dots, n$,设待拟合的二次曲线方程为:

$$Y = aX^2 + bX + c \quad (8)$$

将 n 个数据点代入式(8),得到矩阵:

$$\begin{bmatrix} X_1^2 & X_1 & 1 \\ X_2^2 & X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & X_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{设, } A = \begin{bmatrix} X_1^2 & X_1 & 1 \\ X_2^2 & X_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n^2 & X_n & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \text{ 矩阵}$$

可转变为:

$$AB = C \quad (10)$$

最终求得 B 为:

$$B = (A^T A)^{-1} A^T C \quad (11)$$

由公式(11)可求得值 a, b, c 。

3.2 光管照度标定

在暗室条件下,将光管置于封闭箱中,将照度计接收口与光管出光口于同一水平线上,接通光源,通过软件测量不同步长的照度值,如图7所示。需要模拟的星等范围为 $2 \sim 7$ Mv,即照度范围约为 $2.512^5 \approx 100$ 倍,设置调节档位为10 000档。10 000档调节可等效于星等分辨率约为0.005 Mv,软件设定调整步长0.05 Mv。调整完成后,通过优化的驱动设计,可保证长时间工作照度变化量不超过10%。用微光照度计测量光

管照度, 调节步进, 测量从 100 占空比到 10 000 占空比的光管照度, 每 100 个占空比为一个单位, 记一次, 将照度及占空比拟合成一条曲线, 从而通过调节占空比来调节星等照度。选取 7 颗星来记录数据, 如表 3 所示。

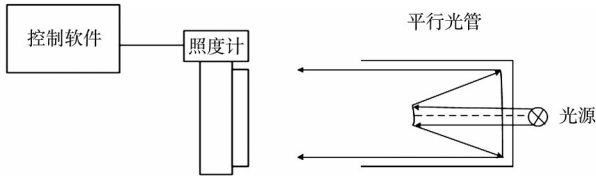


图7 标定照度原理图

表3 HIP号恒星需要模拟的星等

HIP号	星等/Mv	照度/lx
746	2.26	3.289 81E ⁻⁰⁷
4427	2.15	3.640 6E ⁻⁰⁷
8886	3.33	1.227 86E ⁻⁰⁷
109492	3.34	1.216 61E ⁻⁰⁷
1644	6.74	5.309 86E ⁻⁰⁹
8475	6.46	6.872 09E ⁻⁰⁹
109017	5.11	2.382 95E ⁻⁰⁸

如图 8、图 9 所示, 在暗室条件下, 将光管置于支撑架上, 与光源发出端在同一水平直线上, 用 IM-3 型微光照度计, 测量 100 占空比到 10 000 占空比的照度。

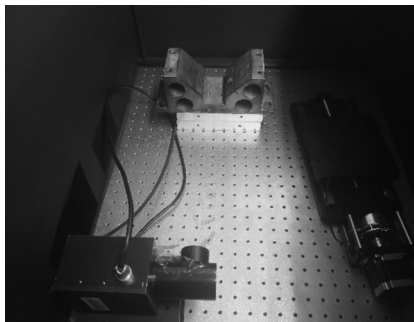


图8 标定实验图

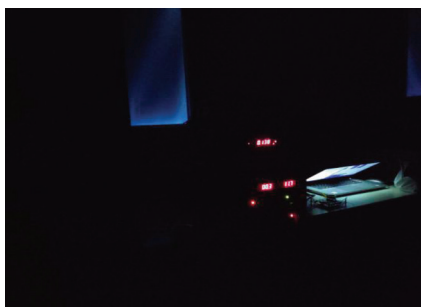


图9 实验环境

光管测量照度值曲线如图 10 所示(仅以 HIP746 光管举例说明)。

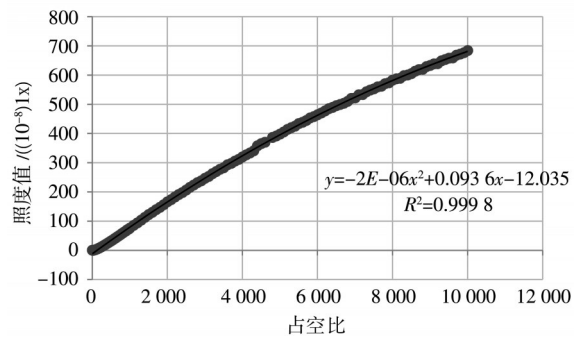


图10 拟合曲线

根据计算, 可得出 7 颗模拟星所加滤光片的方案, 如表 4 所示, 在平行光管后端加入滤光片, 使其达到标定的照度值。

表4 滤光片方案

模拟HIP号	滤光片方案
746	一片透过率为1%的滤光片
4427	一片透过率为0.1%的滤光片
8886	一片透过率为0.1%的滤光片
109492	一片透过率为0.1%的滤光片
1644	两片透过率为1%的滤光片
8475	两片透过率为1%的滤光片
109017	一片透过率为0.1%的滤光片, 一片透过率为20%的滤光片

3.3 光管位置标定

将经纬仪调至水平状态, 如图 11 所示, 瞄准中央平行光管(HIP 号 3821), 使中央平行光管的激光器的光斑与经纬仪十字丝的中心重合, 此时经纬仪的俯仰角读数应该为 90°, 并且将经纬仪的偏摆角读数设置为 0°。调节光管星点到经纬仪视场中心处, 调整经纬仪的偏摆和俯仰, 使经纬仪的偏摆角读数和俯仰角读数如表 2 所示, 然后调整相应的模拟星的平行光管星点, 使相应的平行光管的激光器的光斑与经纬仪十字丝的中心重合, 这样就保证了所有模拟星的角度准确性。

3.4 暗室测试

标定工作完成后, 在暗室环境下, 用 IM-3 型微光照度计测量各光管照度值, 记录下实际

照度,并通过调节占空比在 ± 1.5 Mv范围内调节星等,连续工作4 h后,记录下实际照度。表5为实验室实测值。从表5可看出,实测星等与理论星等的最大相对误差为4.7%,工作4 h后最大照度误差为6.69%,且在 ± 1.5 Mv范围内可调,将模拟天区静置24 h,用徕卡经纬仪检测各光管位置,光管位置偏移量最大为 $2.48''$ 。验证了通过调节占空比从而调节星等的有效性。

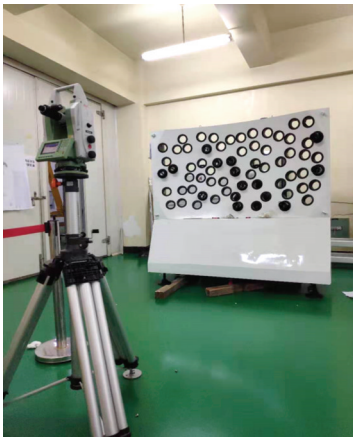


图11 位置标定实验图

表5 实验室实测值

理论星等/Mv	理论照度/lx	实际照度/lx	照度误差/%	4h后实测照度值/lx	4h照度误差/%
2.26	$3.289\ 81E^{-07}$	$3.16E^{-07}$	-3.89	$3.20E^{-07}$	-2.73
2.15	$3.640\ 6E^{-07}$	$3.49E^{-07}$	-4.12	$3.85E^{-07}$	5.75
3.33	$1.227\ 86E^{-07}$	$1.24E^{-07}$	0.81	$1.28E^{-07}$	4.25
3.34	$1.216\ 61E^{-07}$	$1.17E^{-07}$	-4.15	$1.25E^{-07}$	2.74
6.74	$5.309\ 86E^{-09}$	$5.56E^{-09}$	4.70	$5.67E^{-09}$	6.69
6.46	$6.872\ 09E^{-09}$	$6.79E^{-09}$	-1.21	$6.98E^{-09}$	1.57
5.11	$2.382\ 95E^{-08}$	$2.34E^{-08}$	-1.87	$2.29E^{-08}$	-3.90

4 结论

实验标定了由多个卡式光管组成的多星模拟器,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、星等可连续调节等优点。理论分析、实验室的结果表明:大视场多星模拟器在模拟星等时,精度约为4%,连续工作4 h的精度优于7%,徕卡经纬仪的测角精度为

$0.5''$,综合人为误差、环境误差、光管调整步长等因素,其综合测角误差为 $2.5''$,即通过该标定过程后,可保证其他模拟星平行光管与HIP3821恒星模拟平行光管的角距误差为 $2.5''$ 。通过工程达到了设计结果,基本满足了真实星等的模拟要求及项目指标要求,证明了通过调节LED恒流控制电路的占空比来实现控制星等的可行性。

参考文献

- [1] 李晓妮. 光谱可调星模拟器技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [2] Thomas S, Immo A, Walter F, et al. Testing FORS: the first focal reducer for the ESO VLT [J]. SPIE, 1998(3355): 20-27.
- [3] 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.
- [4] 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, 38(2): 36-38.
- [5] 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.
- [6] 张晓娟, 张健, 杨俊杰, 等. 星模拟器多星等模拟方法研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1150-1152.
- [7] 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 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.
- [8] 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.
- [9] 周建涛, 蔡伟, 武延鹏, 等. 星敏感器用仪器星等的确定[J]. 宇航学报, 2009, 31(4): 46-50.
- [10] 白洁. 多星模拟器的设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [11] 严小松. 白光LED用荧光材料的制备与性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [12] 王军. 高动态星敏感器关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2019.