

文章编号 1004-924X(2010)06-1326-07

用于天文导航设备检测的星模拟装置

赵晨光, 谭久彬, 刘 俭, 王宇航

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为实现对天文导航设备的实验室检测,设计了一种星模拟装置。对该装置所采用的准直光学系统、数字可调光源进行了研究,并提出了背景光模拟的技术要求。根据天文导航设备的主要技术要求给出星模拟装置的整体结构。介绍了消色差准直光学系统、数字可调光源和确定星点大小及位置的关键技术,并分析了背景光均匀性对星模拟效果的影响。最后,制作了星模拟装置,并进行了相关验证性实验。实验结果表明,该装置能模拟0~5等星,背景光均匀性为94.7%,系统焦距为1 647 mm,视场为28',准直性优于 $\pm 2''$ 。该装置可以同时模拟星光和背景光变化,具有准直性好、背景光照射度模拟范围宽等优点,能够满足天文导航设备的实验室检测要求。

关键词:天文导航;星模拟;光学仿真;光源标定

中图分类号:V448.2;TH753 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101806.1326

Star simulator for testing celestial navigation equipment

ZHAO Chen-guang, TAN Jiu-bin, LIU Jian, Wang Yu-hang

(*Institute of Ultra-precision Optical & Electronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

Abstract: A star simulator using digital adjustable light sources and a collimating optical system is presented to realize a laboratory test of celestial navigation equipment in this paper, and the technical requirements of the background light simulation are proposed as well. Based on the technical requirements of celestial navigation equipment, the overall construction of the star simulator is presented. Then, the key techniques of digital adjustable light sources, achromatic collimating optical system and adjusting for the sizes and positions of the stars are introduced, and the effect of the uniformity of background light on the star simulation is analyzed. Finally, the star simulator is fabricated and the corresponding experiments are carried out for validating its properties. Experimental results indicate that the simulator can simulate the star magnitudes of 0-5 effectively, and can offer the uniformity of background light of 94.7% and collimation better than $\pm 2''$ in the system focus of 1 647 mm and the field of view of 28'. Furthermore, the designed simulator can simulate the changes of star lights and background lights at the same time. It is concluded that the designed star simulator can satisfy the test requirements of celestial navigation in a laboratory.

Key words: celestial navigation; star simulation; optical simulation; light source calibration

收稿日期:2009-04-02;修订日期:2009-05-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60878028)

1 引言

天文导航以其定向精度高、可靠性好等优点,被广泛地应用于航海、航天以及军事等各个领域。随着以天文经纬仪、星敏感器^[1-2]为代表的天文导航设备不断地向高精度、昼夜、全天候导航的方向发展,对用于其检测、标校的实验装置也提出了更高的技术要求。天文导航设备检测主要有内场和外场两种检测方式,外场检测需要对国际公认的已知星等的恒星进行野外拍摄,整个过程受自然条件影响非常大,效率低,人力和资金消耗也非常大^[3-4];而内场检测是在实验室用专用仪器完成测试,相对外场检测具有不受自然条件影响、成本低、容易实现等优点,但受检测装置的功能和精度制约。

星模拟装置是天文导航设备内场检测的主要标定设备,用于提供恒星距离、方位、光谱、星等和辐射背景干扰等模拟信息,主要有大视场星图模拟和小视场单星模拟两类。其中大视场星图模拟具有设备简单、星图实现方便等优点,但模拟精度不高;而单星模拟装置精度较高,却存在功能单一,动态测试需要多维转台配合完成的缺点。在需要对天文导航设备进行高精度检测和标定时,星模拟装置通常采用单星模拟装置配合多维转台的形式。国内中科院西安光机所、长春光机所,哈

尔滨工业大学,中国航天科工集团等部门相继开展了相关研究^[5-8],对恒星星等、光谱等要素进行了论述,但均未对背景模拟的均匀性影响进行仔细讨论。

本文针对天文导航设备内场检测的实际工程需求,设计了一套能够提供较高的准直性,具有模拟星等变化、背景光干扰等功能的单星模拟装置,并针对被检设备具体情况提出了背景光均匀性要求。

2 星模拟装置的构成及其工作原理

星模拟装置由星光光源、滤光片、衰减片、星点板、背景光源、合光棱镜、准直光学系统和控制计算机组成,系统结构如图1所示。

星光光源采用光谱连续、工作稳定的卤素灯作为光源,并用光电探测器监视光强波动,微调电压闭环稳定光强。卤素灯发出的光经过积分球均匀化后出射,通过滤光片选择光谱范围,经过标定的衰减片来确定星等。

星点板为位于准直光学系统焦点上的针孔,要求有较好的圆度,以保证模拟恒星的形貌符合要求。背景光源采用多组高亮白光LED作为光源,通过切换各组LED组合来实现光强粗调,通过调节LED驱动电流来实现光强微调,从而实现

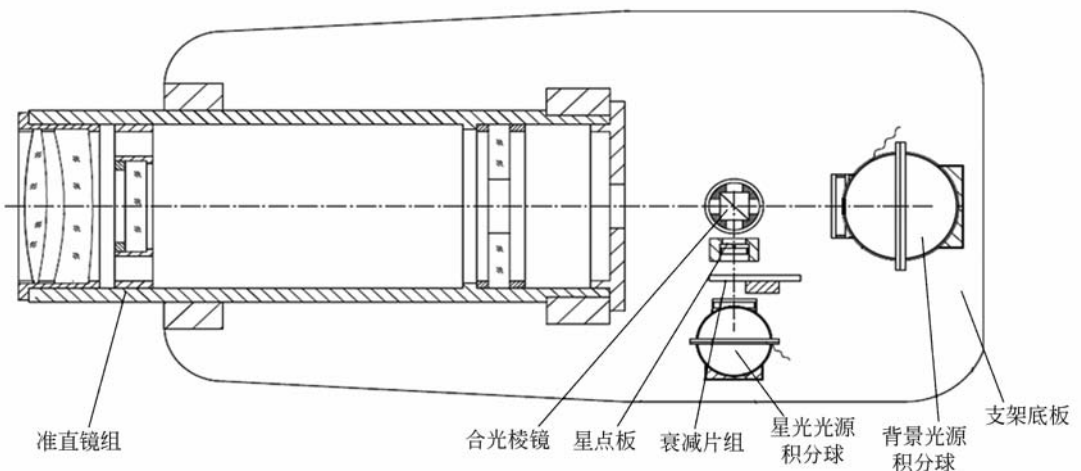


图1 星模拟装置结构示意图

Fig. 1 Schematic layout of star simulator

背景光大范围连续可调。白光 LED 发出的光经过积分球内壁多次漫反射实现输出均匀化。

合光棱镜用于将背景光与星点光叠合。

准直光学系统为改进的卡塞格林系统,使从模拟恒星(星点板)发出的光经过准直光学系统后变为平行光,准直性优于 $\pm 2''$,可完成对真实无穷远恒星目标的光学特征模拟。

控制计算机用于设定星等、调节背景光亮度。

3 星模拟装置中的关键技术

3.1 消色差准直光学系统

天文导航设备是以恒星像的能量质心作为理想基准来实现姿态定位的,这就对星模拟装置的光学系统设计提出了苛刻的要求,这种光学系统不仅是望远系统,而且还应该是有一定视场要求的、高质量的像差校正系统。

考虑到星模拟装置作为一种通用的天文导航测试设备,应该便于安装、调试和运输,因此希望整个星模拟装置结构轻量化、小型化。

星模拟装置用于模拟无穷远恒星,因此其光学系统必须具有较高准直性;并且由于不同类型恒星所对应的光谱范围和中心波长不同(参见表 1),所以要求准直光学系统能够消色差。

表 1 导航恒星光谱

Tab. 1 Navigation stellar spectra

星光谱类型	光谱/ μm	中心波长/ μm
A ₂ ~A ₉	0.30~0.40	0.35
F ₀ ~F ₉	0.35~0.60	0.45
G ₀ ~G ₉	0.48~0.68	0.56
K ₂ ~K ₉	0.56~0.82	0.64
M ₀ ~M ₉	0.71~1.10	0.85

卡塞格林反射式结构光学系统是无色差系统,能满足准直性和消色差要求,但是这种结构存在视场小、易受杂散光干扰、非球面加工成本高等缺点。

改进的卡塞格林反射结构将非球面改为球面,并在前端添加校正镜组,达到控制成本、增大视场并且抑制杂散光的目的,但是折射镜组又引入了色差问题。因此,采用波差法针对 F₀~F₉, G₀~G₉, K₂~K₉ 星光谱的中心波长计算校正镜

组的初始结构,在保证校正镜组自身消色差条件下,将其与反射镜组联合优化,最终得到满足要求的结果。

改进的系统焦距为 1 647 mm, F 数为 9, 视场为 28', 光路结构如图 2 所示。

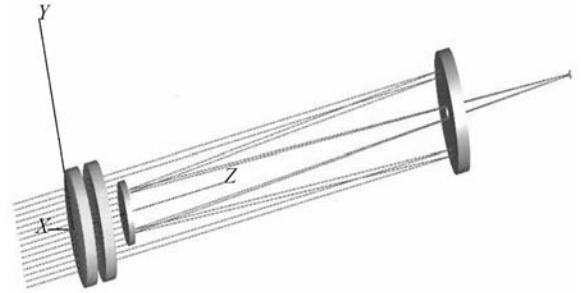


图 2 改进的卡塞格林光学系统结构图

Fig. 2 Layout of improved Cassegrain optical system

校正后系统残余二级光谱为 0.011 mm, 根据系统焦距计算可得引入的准直误差约为 $0.12''$, 对系统准直性影响不大。

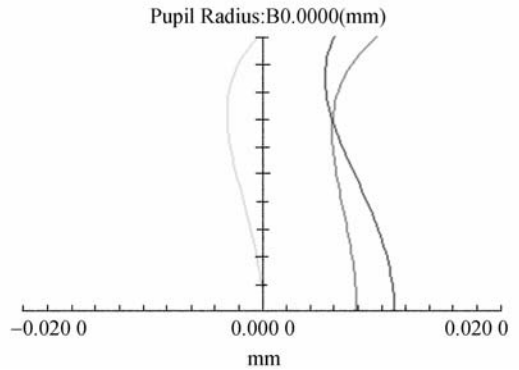


图 3 光学系统球差曲线图

Fig. 3 Longitudinal aberration of optical system

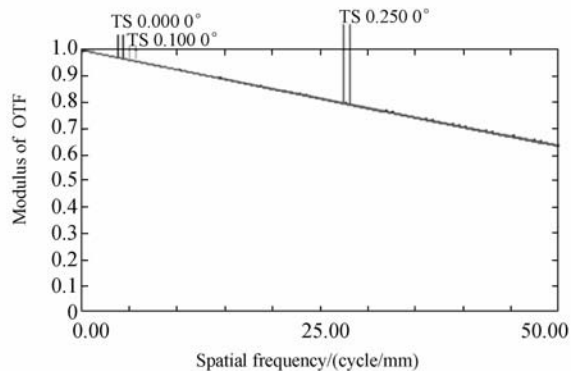


图 4 光学系统调制传递函数图

Fig. 4 OTF in optical system

设计结果接近衍射极限,传递函数在 25 lp 时达到 0.8,50 lp 时达到 0.6,全视场范围内满足 5 μm 集中 80% 以上能量的设计要求。

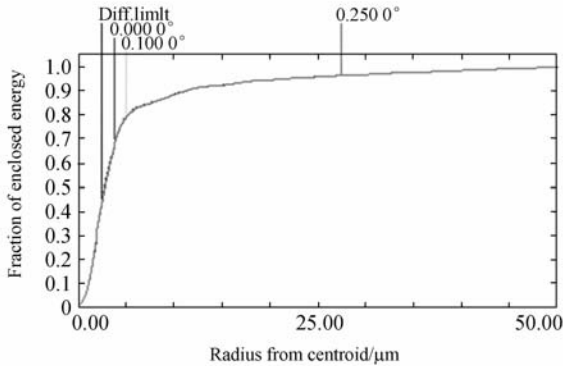


图 5 光学系统衍射圆包围能量图

Fig. 5 Energy enclosing of optical system

3.2 光源系统

星模拟装置用来模拟天空背景中的无穷远恒星。除了要保证光束出射准直性,主要应考虑恒星光谱范围、星等和背景光因素,这些指标均由光源决定。

星光光源采用卤素灯,主要利用其光谱连续、工作稳定、使用寿命长的特点。对模拟的最高亮度 0 等星的输出辐照度精确衰减并闭环稳定,以此作为基准,通过不同的中性衰减片实现不同星等输出辐照度调节。各星等间有如下关系

$$m = -\sqrt[5]{100 \log_{E_0} E}, \quad (1)$$

式中, E 为照度, E_0 为 0 等星照度, m 为星等。每两个整数星等间辐照度相差 2.512 倍。

具体换算关系已有专门文献论述^[9],本文的星模拟装置采用 11 个中性滤光片实现 0~5 等星调节,具体参数如表 2 所示。

表 2 各组滤光片透过率

Tab. 2 Transmittances of composite filters

序号	星等	透过率/%	序号	星等	透过率/%
1	0	100	7	3.0	6.32
2	0.5	63.2	8	3.5	3.98
3	1.0	39.8	9	4.0	2.51
4	1.5	25.1	10	4.5	1.66
5	2.0	16.6	11	5.0	1.0
6	2.5	10.0			

天文导航设备除接收来自确定方位的恒星辐

射外,还会接收到其它辐射源的散射干扰,如银河系、月球、行星、太阳、地球的辉光干扰。因此,星模拟装置的背景模拟非常重要,对背景辐照度的均匀性也提出了较高的要求。

表 3 和表 4 分别给出了导航用恒星和天空背景在某型天文经纬仪 CCD 靶面上的照度情况。

表 3 恒星在某型天文经纬仪 CCD 上的辐照度值

Tab. 3 Irradiance values of star on a CCD in astronomical theodolite

星等	0	1	2	3	4	5
靶面照度/lx	13.85	5.52	2.20	0.86	0.35	0.14

表 4 背景光在某型天文经纬仪 CCD 上的辐照度值

Tab. 4 Irradiance values of background light on a CCD in astronomical theodolite

天空背景/(lx/sr)	1000	2000	3000	4000	5000
靶面照度/lx	5.25	10.50	15.75	21.00	26.25

分析背景光源均匀性要求,根据表中技术条件计算,若要求白天观测到+3 等星,当取白天背景为 3 000 lx/sr 时,天空背景转换为 CCD 照度为 15.75 lx,星点照度为 0.86 lx,对比度要求为 0.86 lx/15.75 lx=5.5%。同样计算夜间探测到+4 等星时的对比度要求约为 6.7%。为防止背景光干扰测量,要求背景光均匀性应达到 95% 以上。

利用多组高亮白光 LED 作背景光源,模拟背景光照度变化为 0~3 000 lx。根据技术要求及以往设计经验,采用积分球对 LED 输出光进行均匀化,均匀性可达到 95% 以上,满足技术要求。

3.3 星点尺寸及位置的确定

星点针孔尺寸决定了在被检天文导航设备像面上所成星点像的大小。小的星点针孔尺寸更有利于模拟恒星对地球的辐射张角,但其对加工工艺和系统能量的要求较高;同时考虑该星模拟装置将被用于天文经纬仪的动态检测,而该天文经纬仪稳定跟踪条件要求星点在 CCD 靶面成像尺寸应大于 2×2 个像元,从而星点针孔尺寸的选取不能过小。综合考虑各项实际影响因素,确定针孔尺寸为 10 μm。

星点针孔位置决定了星模拟装置出射光束的

准直性。为保证出射光束准直性误差优于 $\pm 2''$ ，根据焦距计算得到针孔的位置误差应小于 0.14 mm，这将由最后系统装调保证。

根据准直系统口径较大的特点，装调时选用五棱镜法保证系统出射光束准直性。首先，以分划板代替针孔放置在准直系统设计焦点位置处；然后，将五棱镜固定在准直系统前的平移台上，平移台运动方向与光轴方向垂直，用自准直仪观测经五棱镜出射的分划像，平移台移动使五棱镜分别位于准直系统口径的两端。若出射为平行光，则准直系统的分划像相对于自准直仪分划线不会产生横向移动；若运动过程中发生分划像横向移动，则修切垫圈厚度，调整分划板位置，直至自准直仪观察不出分划像移动为止，完成系统实际焦面确定。最后，将针孔固定在实际焦面处，从而保证出射光束的准直性。

准直性调校精度主要受五棱镜面形误差，导轨运动造成的五棱镜旋转误差和自准直仪测量误差等影响。参照已有文献分析^[10]进行计算得到，五棱镜面形偏差造成的准直性误差 δ_1 为 $\pm 0.46''$ ，五棱镜旋转造成的准直性误差 δ_2 为 $\pm 1''$ ，自准直仪测量误差 δ_3 为 $\pm 0.2''$ 。不考虑环境影响条件下五棱镜法调校准直性极限误差为

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \pm 1.12'' \quad (2)$$

可见当自准直仪观察不出分划像移动时，系统残余的准直性误差优于 $\pm 2''$ ，满足星模拟装置的准直性要求。

4 测量实验与结果

根据上述分析结果，设计制作了星模拟装置。图 5 给出了模拟光源系统实物图，图 6 给出了星模拟装置的实物图。



图 6 模拟光源系统硬件实物图

Fig. 6 Star light simulator

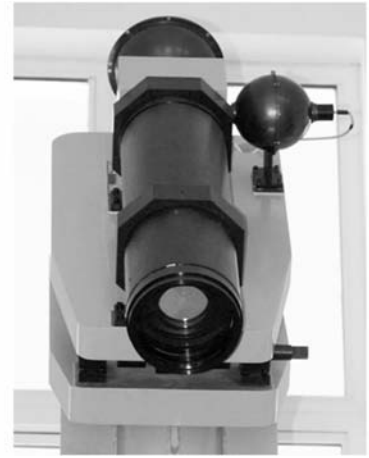


图 7 星模拟装置实物图

Fig. 7 Star simulator

性和稳定性实验。

4.1 背景光源均匀性实验

对背景光源积分球输出均匀性进行测试，在保证照度计探测器与积分球出口在同一水平面的条件下按图 6 选择测试位置。测量点选中心位置 1 点和在上、下、左、右方向上从中心到边缘 2/3 距离处沿圆周均匀分布的 4 点。

数据处理按照 5 点数据的均方差与 5 点数据的平均值的比值计算均匀性指标。实验结果列在表 5 内，背景光均匀性为 94.7%。

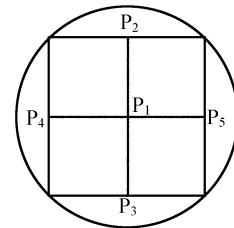


图 8 均匀性测试点选取位置图

Fig. 8 Distribution map of selected points for uniformity test

表 5 背景光模拟积分球系统均匀性测试数据表

Tab. 5 Uniformity test results of background light integration sphere

位置	测试数据/lx	平均值	均方差	均匀性
P ₁	313			
P ₂	289			
P ₃	271	291.8	15.37	94.7%
P ₄	305			
P ₅	281			

借助标定后的照度计分别进行光源的均匀

4.2 光源稳定性测试

分别对星光模拟光源和背景光模拟光源的输出状态进行测试,开机预热 30 min 后,测试 1 h,实验结果分别如图 8 和图 9 所示。

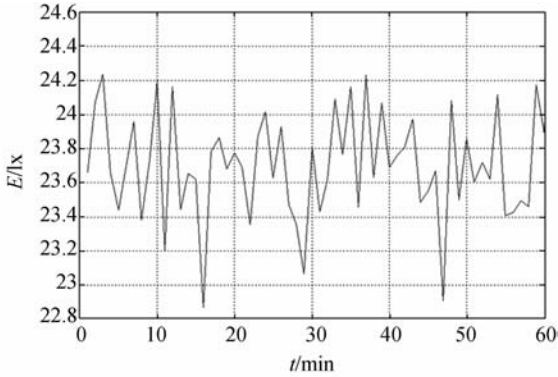


图 9 星光模拟光源稳定性测试图

Fig. 9 Stability test results of star light simulator

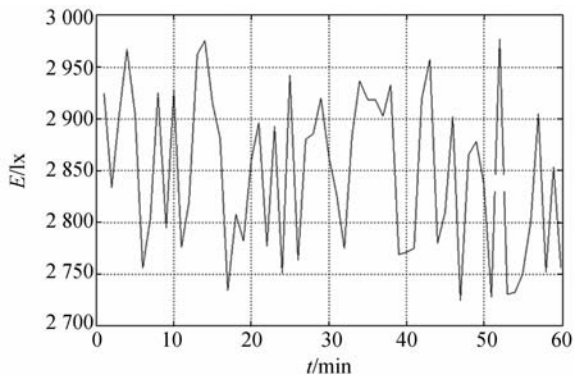


图 10 背景光模拟光源稳定性测试图

Fig. 10 Stability test results of background light

星光光源输出照度均值为 23.70 lx,最大值为 24.24 lx,最小值为 22.87 lx,标准差为 0.31 lx,最大偏离量为 3.5%(0.83 lx)。

背景光源输出照度均值为 2 848 lx,最大值为 2 977 lx,最小值为 2 724 lx,标准差为 76.2 lx,最大偏离量为 4.6%(129 lx)。

5 结 论

本文根据现代天文导航设备实验室检测的要求设计了一种星模拟装置。首先,介绍了星模拟装置的结构组成和工作原理;然后,研究了准直光路的设计方法,利用光学设计软件 ZEMAX 设计了准直光学系统;同时,根据光源系统的系统需求,特别分析了背景光对星点像的影响,给出了背景光均匀性要求;最后,制备了星模拟装置光源和整体装置。实验结果证明:星模拟装置能模拟 0~5 等星,准直性优于 $\pm 2''$,积分球光源背景光均匀性达到 94.7%,基本满足设计要求。该星模拟器为天文导航设备的实验室检测提供了有效的技术保证。

参考文献:

- [1] 王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. 电子学报, 2007,35(12):2247-2351.
WANG A G. Modern celestial navigation and key techniques [J]. *Acta Electronica Sinica.*, 2007,35(12):2247-2351. (in Chinese)
- [2] 李葆华,马衍宇,刘睿,等. 适用于星敏感器的预测未知恒星星像质心算法[J]. 光学精密工程, 2009, 15(9):1428-1431.
LI B H, MA Y Y, LIU R, *et al.*. Obtaining method for star locations in local region of star Image for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,15(9): 1428-1431. (in Chinese)
- [3] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏感器天文标

定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006,14(4):558-563.

LI C Y, LIN H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):558-563. (in Chinese)

- [4] 刘亚平,李娟,张宏. 星模拟器的设计与标定[J]. 红外与激光工程,2006,35:331-334.

LIU Y P, LI J, ZHANG H. Design and calibration of star simulator [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2006,35:331-334. (in Chinese)

- [5] 张文明,王效才,段海峰. 星敏感器单星模拟光源系统[J]. 光电工程, 1998,12(25):26-30.

ZHANG W M, WANG X C, DUAN H F. Light source system for simulating single star used in cali-

- bration of star sensor [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 1998,12(25):26-30. (in Chinese)
- [6] 刑飞,武延鹏,董瑛,等. 微型星敏感器实验室测试系统研究[J]. 光学技术,2004,30(6):703-709.
XING F, WU Y P, DONG Y, *et al.*. Research of laboratory test system for micro-star tracker [J]. *Opt Tech*, 2004,30(6):703-709 (in Chinese)
- [7] 巩岩,胡宜宁,赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1698-1704
GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1698-1704. (in Chinese)
- [8] 田玉龙,王广君,房建成,等. 星光模拟的半物理仿真技术[J]. 中国航天,2004,(4):25-26.
TIAN Y L, WANG G J, FANG J C, *et al.*. Physical simulation of simulative star light [J]. *Aerospace China*, 2004,(4):25-26. (in Chinese)
- [9] 郭玉蛟. 星模拟器概述[J]. 控制工程,1986,(5):42-47.
GUO Y J. Overview of star simulator [J]. *Control Eng. of China*, 1986,(5):42-47.
- [10] 用 ZEMAX 模拟五棱镜误差对平行度检测的影响[J]. 应用光学,2007,28(5):649-653.
YAN Y D, HE J H, CANG Y P, *et al.*. Effect of penta prism error on parallelism detection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007,28(5):649-653. (in Chinese)

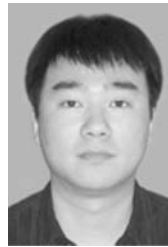
作者简介:



赵晨光(1980—),男,黑龙江庆安人,博士研究生,2003年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学设计,光电测量和衍射光学等方面的研究。E-mail: zcg_hit@163.com



谭久彬(1955—),男,博士,教授,博士生导师,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现任哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要从事超精密测量技术与仪器工程、光机电一体化技术方面的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn



刘 俭(1974—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,硕士生导师,1997年在西南交通大学获得学士学位,2002年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事衍射光学、光电测量与检测技术等方面的研究。E-mail: liujian@hit.edu.cn



王宇航(1986—),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,2008年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光电测量与检测技术等方面的研究。E-mail: wangyuhang1986@126.com