

doi:10.3788/gzxb20174603.0312002

基于 LCoS 拼接技术的动态星模拟器光学引擎的优化设计

孟遥¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞^{1,2}, 刘石¹, 赵云率¹

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

摘 要: 为了降低基于硅基液晶拼接的动态星模拟器背景杂散光, 对传统的光学引擎进行优化, 提出一种多偏振分光棱镜组合方式, 并对其光机结构进行设计. 阐述了光学引擎照明系统的设计方案, 讨论了降低视场角、增强均匀性的方法. 通过 Tracepro 对照明光学系统进行仿真, 对照明光源设计方案的可行性进行了验证. 实验结果表明: 优化后的动态星模拟器杂散光辐照度降低了 2.93 倍. 优化后的光学引擎有效地抑制了背景杂散光, 并且增强了两片反射式硅基液晶对比度的一致性.

关键词: 反射式硅基液晶; 拼接技术; 光学引擎; 偏振分光棱镜; 照明光学系统; 光学设计

中图分类号: V524.7; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0312002-11

Optimal Design of Optical Engine for Star Simulators Based on LCoS Splicing

MENG Yao¹, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei^{1,2}, LIU Shi¹, ZHAO Yun-shuai¹

(1 College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to meet the requirement that the dynamics star simulators based on liquid crystal on silicon splicing reduce the stray light in the background, the traditional optical engine were optimized. A method of combining multiple polarization beam splitter into one components was proposed to optimize optical engine, and the design of the optical-mechanical structure was made. This paper expounded the design scheme of lighting system for optical engine, and we elaborated the method of reducing the field-of-view angle and increasing the uniformity. The lighting optical system was simulated by Tracepro, and the feasibility of the programme was verified. According to the results we can get that the stray light irradiance of the dynamic star simulator was reduced by 2.93 times after optimization, hence, the optimized optical engine effectively suppresses the stray light of background, and improved the consistency of the contrast ratio between the two pieces of liquid crystal on silicon.

Key words: Liquid crystal on silicon; Splicing technology; Optical engine; Polarization beam splitter; Lighting optical system; Optical system design

OCIS Codes: 120.1680; 120.2040; 120.4570; 150.2945; 290.2648

0 引言

星敏感器是以恒星为参照目标对航天器姿态进行测量的设备, 其性能决定了卫星的姿态控制准确度, 因而星敏感器的地面标定与测试具有重大意义^[1]. 星模拟器是星敏感器的地面检测设备, 其主要功能是模拟空

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(No. 20160204008GX)和长春理工大学科技创新基金(No. XJLG-2016-15)资助

第一作者: 孟遥(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航天器地面模拟测试与标定技术. Email: 505418584@qq.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、光电仪器与检测技术等. Email: zh_guoyu@163.com

收稿日期: 2016-09-19; 录用日期: 2016-12-07

<http://www.photon.ac.cn>

间目标,在实验室完成对星敏感器的标定及功能测试.相对于传统的观星实验,星模拟器的应用打破了星敏感器地面检测受环境影响的局限性.星模拟器按照不同工作方式可以分为静态星模拟器及动态星模拟器^[2].静态星模拟器一般用于地面标定,而动态星模拟器主要作为星敏感器功能检测的激励源,通过使两者组成闭环测试系统,对星敏感器的星点提取、星图识别等算法进行地面验证.动态星模拟器具备更全面的地面检测能力,因此是目前主要的研究方向^[3-4].

动态星模拟器主要利用投影系统的光学引擎作为动态靶标,其性能制约着动态星模拟器的整体性能.光学引擎主要由照明光学系统、偏振转换组件及显示芯片组成,其中显示芯片是光学引擎的核心组件,主要功能是对空间光进行调制,从而对不同对比度的图像进行显示.反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)是一种新型的显示芯片,相对于传统的薄膜晶体管液晶显示屏(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display, TFT-LCD)和数字微镜器件(Digital Light Processing, DMD)等显示芯片, LCoS具有开口率高、像元尺寸小等优点^[5],这些特性可以增强星模拟器星等模拟范围,提高星点位置准确度、降低自身体积,满足了动态星模拟器多星等、高准确度、小型化等方面的技术要求^[6].但作为一门新兴投影技术, LCoS由于国内的生产技术不成熟,因此无法达到大面阵的要求,而为了使动态星模拟器可以获取更大视场,主要采用光学拼接技术对加工工艺的不足进行补偿^[7]. LCoS对不同偏振光具有不同响应,拼接的 LCoS光学引擎会产生大量杂散光,对星敏感器的星点提取造成影响.本文从 LCoS的工作原理出发,对基于 LCoS拼接的动态星模拟器光学引擎进行优化设计,并对系统中的照明系统进行重点研究.

1 LCoS 拼接动态星模拟器组成部分及关键技术

1.1 动态星模拟器的主要组成

LCoS 拼接动态星模拟器主要根据姿态与轨道控制动力学仿真计算机提供的星敏感器工作信息,寻找当前姿态下的导航星,利用星模拟器的控制,计算机将导航星所在区域的星图信息通过驱动版传递给 LCoS 显示,星图经过准直光学系统调制后成平行光出射,将星模拟器的出瞳与星敏感器的入瞳衔接,由此完成对无穷远星图的模拟.因此其主要组成部分按功能可以分为三部分,分别是上位机、测试调整机构及动态星模拟器头部,主要功能及组成如表 1 所示^[8-9].

表 1 动态星模拟器组成及功能
Table 1 The composition and function of the dynamic star simulator

Name	Composition	Function
Upper computer	The host computer, display, the simulation software of star map, communication interface (including the UDP protocol, the CAN protocol, RS232 and RS422) and cable, et al.	According to the optical axis pointing to the star sensors, it showed the navigation map for the star simulator, then the data would transfer to LCoS display on the head of star simulator
Test adjusting mechanism	Optical platform, two-dimensional translation machine, one-dimensional translation table, the turntable and angular displacement rotary table	According to adjust the relative position between the star simulator and star sensors, the exit pupil of star simulator would connect with entrance pupil of star sensor, and to ensure consistency of both optical axis
The dynamic star simulator head	Collimation optical system, optical engine, driven circuit board and power supply	To simulate any zenith angle to the location of the object by the optical engine of collimation optical system, then it would realize the dynamic display of the arbitrary map

其中,动态星模拟器头部为设备核心,分别通过光机、光电接口与上位机及调整机构相衔接形成完整机构,实物照片如图 1 所示.



图 1 LCoS 拼接动态星模拟器实物照片
Fig. 1 The photo of LCoS splicing dynamic star simulator

1.2 LCoS 拼接技术分析

动态星模拟器的 LCoS 拼接采用光学拼接方法. 通过对 LCoS 光学引擎中偏振分光棱镜 (Polarization Beam Splitter, PBS) 的功能进行拓展, 实现同一偏振器件完成起偏、检偏及分光的作用. LCoS 拼接光学引擎工作原理如图 2, 理想线偏振光通过 LCoS 处于“开”状态下像素的反射调制, 光矢量方向会有 π 的改变, LCoS 1 将反射过来的 S 波调制成 P 波, LCoS 2 将透射光调制成 S 波, 经过调制的光线经过 PBS 分别透射和反射至光学系统内, 成像至无穷远; 而 LCoS 处于“关”状态下的像素点不对光波进行调制, 未经 LCoS 调制的线偏振光光矢量方向没有改变, 经 PBS 反射和透射至光入射的方向, 光线无法通过光学系统成像^[10].

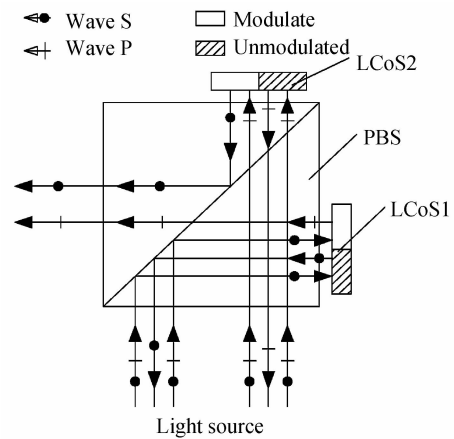


图 2 LCoS 拼接光学引擎工作原理
Fig. 2 Working principle of LCoS splicing optical engine

LCoS 拼接的基本原则是满足搭接要求及共面要求^[11], 拼接思路是利用其为显示器件的特性, 以一片 LCoS 显示区域的一列边缘线阵及一行中心线阵为基准线, 通过平移及相对旋转, 使另一片 LCoS 的边缘线阵与基准片的边界线阵平行且无缝隙, 两片 LCoS 的中心线阵成一条直线, 最终在视场中, 形成一个“十”字.

2 LCoS 拼接动态星模拟器光学引擎总体方案优化及结构布局

2.1 光学引擎优化设计原理

传统拼接的光学引擎结构以一块 PBS 作为拼接、起偏及检偏的元器件, 但是 LCoS 仅能调制线偏振光, 限制了其应用范围. 针对这个问题, 本文对 PBS 偏振度与照明光线入射角之间函数关系进行研究, 发现经 PBS 起偏光线的角度应小于 $\pm 5^\circ$, 减轻图像的光学噪声; 同时应避免不同的起偏方式, 降低两片 LCoS 显示图像对比度的差异^[12]. 根据所得结论对拼接系统的光学引擎进行两方面优化.

1) 光学引擎拼接结构优化

为了获得两片 LCoS 对比度统一的像面, 采用多棱镜组合的拼接结构配合 $1/4$ 波片对传统光学引擎进行优化, 优化的拼接光学引擎结构示意图如图 3. 多棱镜组合拼接的光学引擎结构是将原来的一块 PBS 拆分为两块 PBS 与一块半透半反棱镜, 这样可以保证两片 LCoS 的照明光线采用同样的起偏方式, 使两片 LCoS 对比度接近. 而为了保证星模拟器发出的光线不会通过星敏感器的保护玻璃而反射到星模拟器的像面, 需要在星模拟器出瞳位置增加一块 $1/4$ 波片. 光线通过波片后产生 $\lambda/4$ 的光程差, 即 $\pi/2$ 的位相差, 当这束光线

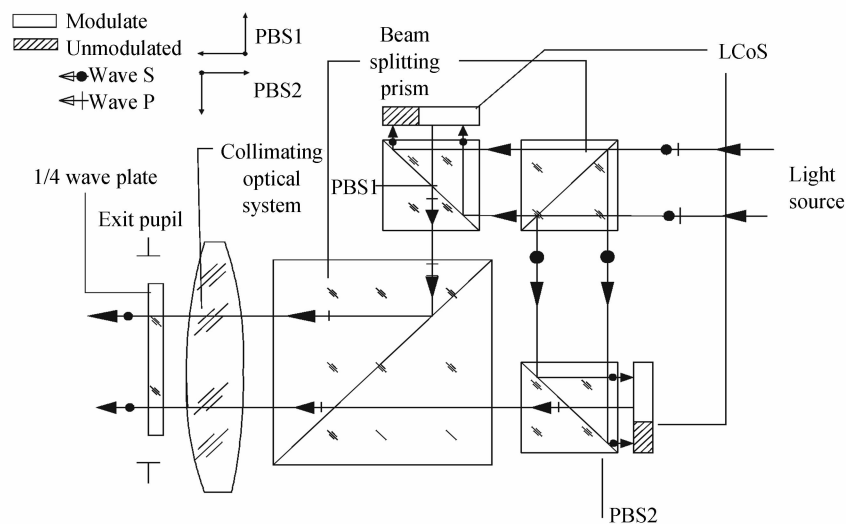


图 3 光学引擎优化结构
Fig. 3 Optimized structure of optical engine

经星敏感器的保护玻璃反射到星模拟器时,其振动方向会有 π 的改变^[12],这样反射回星模拟器中的杂散光经 PBS 的检偏无法反射至 LCoS.

2) 照明系统光学性能优化

传统动态星模拟器的 LCoS 拼接光学引擎采用柯勒照明,其主要特点是将灯源成像至所需照明靶面处,使得投影器件有足够的光强进行成像.但是基于偏振度与照明光线入射角之间的关系及同一星图下模拟星等的一致性,LCoS 光学引擎的照明系统需要满足准直、均匀的照明要求.由于灯源的尺寸与照明系统的视场角存在耦合关系,因此照明系统的设计需要对光线进行配光、扩束及匀光,最终实现对 LCoS 光学引擎照明系统的优化设计.

2.2 光学引擎光机结构设计

针对 LCoS 拼接过程中的技术要点,光学引擎的机械结构总体设计如图 4 所示.

拼接系统以镜筒预留的基准面对半透半反棱镜进行限位,棱镜框与镜筒同轴,所以镜筒基准面与拼接系统的基准面符合基面合一原则,两组 LCoS 调节机构分别固定于棱镜框中的两个副棱镜框上,LCoS 通过视场光阑与调节机构相连接,而其位置的调节通过对光阑的位置调节实现,因此整套拼接系统中光阑与调节机构是最关键的组成部分.

2.2.1 视场光阑的设计

拼接的 LCoS 视场光阑主要作用是对无像素反射区域及像素屏蔽区域进行消光,利用视场光阑对显示区域的口径进行限制,LCoS 被屏蔽的像素通过视场光阑进行遮挡,为了精确地显示 LCoS 的有效像素,应对视场光阑进行多次精加工及复测,确保其开口的线性尺寸准确度及与 LCoS 显示区域边缘线阵的平行度.

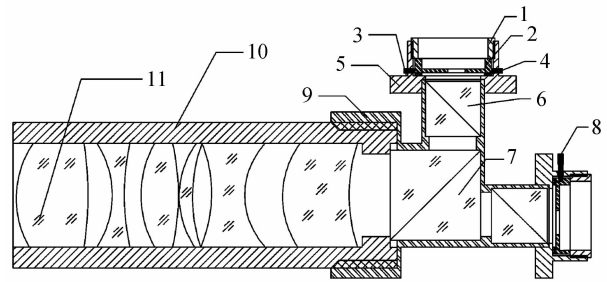
由于后截距非常短,主要利用 LCoS 与调整结构的连接件作为视场光阑,因此需要连接件对 LCoS 的自由度有足够的约束,使 LCoS 在每次加工后的连接件上的相对位置保持不变.鉴于以上条件,连接件设计为圆柱体,对 LCoS 的限位采用凹槽式设计,以 LCoS 的靠面为基准面,且 LCoS 与连接件形成过盈配合,可以在多次装配下复位.同时采用凹槽式设计的连接件厚度不受后截距约束,可以保持较强刚度,在两片 LCoS 相对位置确定后,连接件不会因为受到约束力而变形,从而影响拼接准确度.连接件的设计如图 5 所示.

2.2.2 LCoS 调节机构

LCoS 的调节机构利用四个自由度来完成两片 LCoS 的拼接过程,相对于图 5 中的坐标系,这四个自由度分别为:沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的移动及绕 Z 轴的回转,而对机构的调节方法转变为对这四个自由度的约束.

沿 Z 轴的移动为星模拟器定焦的过程,调焦过程中需要反复装调、测量,多次修正焦面位置,所以调焦系统结构采用调焦环控制 LCoS 的离焦量,并利用压圈进行约束.LCoS 调节机构使用顶丝控制 LCoS 连接件在 X 轴及 Y 轴方向的位移并对其进行约束.在拼接过程中,通过透射片在 XOY 平面上的位移实现光轴对准,两片 LCoS 的相对位置则依靠反射片进行调整.光轴对准的误差不会影响星间角距误差,而两片 LCoS 相对位置的误差会造成不同 LCoS 显示的星点间角距的改变,所以针对两片 LCoS 采用不同的方式对自由度进行约束.

1) 透射片 LCoS



1. Pressing ring; 2. LCoS fittings; 3. Jackscrew; 4. Focusing ring;
5. LCoS adjusting mechanism; 6. PBS; 7. Beam splitter prism;
8. Rotating adjustment rod; 9. Prism box; 10. Lens cone;
11. Collimation optical system

图 4 优化后光学引擎机械结构剖面图

Fig. 4 Mechanical structure profile of optimized optical engine

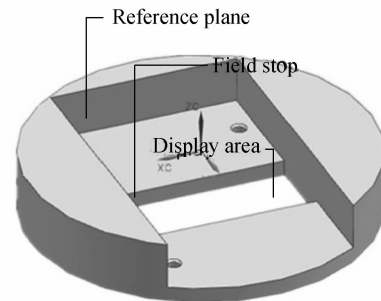


图 5 LCoS 连接件设计图

Fig. 5 LCoS connector design

光轴与像面的交点为一点像, LCoS 拼接面中心与光轴点像的对准可以视为在同一平面上两点间的一维运动, 因此 LCoS 透射片的位移可以采用三个均匀分布于圆周的顶丝进行约束. 三个方向力大小相等, 即 $F_1 = F_2 = F_3$, 且之间的夹角为 120° . 对连接件的受力情况进行正交分解, 如图 6 所示.

图 6 中对于 F_3 在 X 轴及 Y 轴上的垂轴分量 F_{3X} 、 F_{3Y} , 可以得到: $F_{3X} = F_3 \cdot \cos 30^\circ = 0.866 F_3$; $F_{3Y} = F_3 \cdot \sin 30^\circ = 0.5 F_3$. 同理, F_2 的垂轴分量分别为: $F_{2X} = 0.866 F_2$; $F_{2Y} = 0.5 F_2$. 当 $F_1 = F_2 = F_3$ 时, $F_{3Y} + F_{2Y} = F_1$, $F_{2X} + F_{3X} = 0$, 此时 LCoS 连接件上的力达到平衡. 而当 $F_1 \neq F_2 \neq F_3$ 时, 连接件会根据三个方向力的合力做线性移动, 从而实现光轴对准. 透射片 LCoS 的连接件与调节机构间的装配结构如图 7 所示.

在保证 LCoS 连接件所在平面垂直于转动轴方向的自由度被约束的前提下, 实现两片 LCoS 相对转动的准确度是保证转动自由度的独立性, LCoS 透射片在 XOY 平面内两个方向的自由度均被约束, 因此将转动自由度设置在透射片的连接件上. 具体的设计方法是在调整件上加工一个 U 型孔, 孔位中心的 Z 轴坐标位于 LCoS 连接件前后端面的中心附近的位置, 孔位宽度大于旋转调整杆的宽度, 可调整角度为 $-10^\circ \sim 10^\circ$. 调整杆及 U 型孔如图 8 所示.

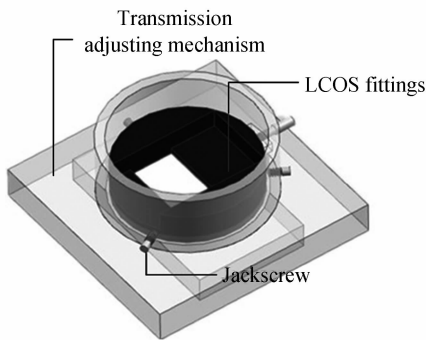


图 7 透射片 LCoS 位移调节机构
Fig. 7 Displacement regulating mechanism of transmission LCoS

2) 反射片 LCoS

LCoS 反射片通过自身的位移实现两条边缘线阵的无缝搭接及中心线阵共线, 从而形成一个像素连续的拼接面. 为了保证反射片 LCoS 的调节准确度, 其应具备两个独立的自由度, 根据这一特点, 使用设置平行面的设计方法: 利用 LCoS 连接件及调节机构这两个相互接触的平行面, 分别对其自由度进行约束, 达到反射片 LCoS 在自己的空间平面内具备运动方向互相垂直的自由度约束, 连接件与调节机构间的装配结构如图 9 所示.

整套光学引擎爆炸图如图 10 所示.

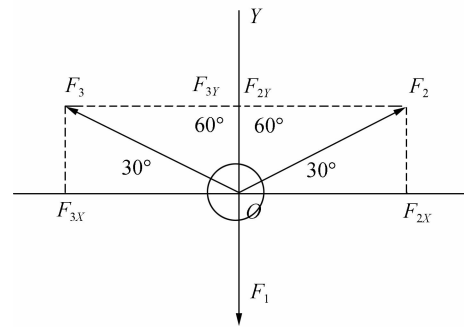


图 6 连接件受力正交分解图
Fig. 6 Orthogonal decomposition of the force on connecting equipment

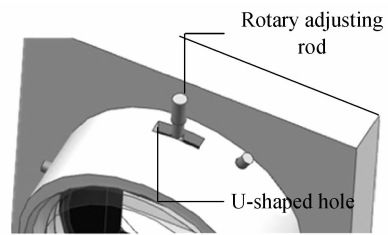


图 8 透射片 LCoS 旋转调节机构
Fig. 8 Rotary regulating mechanism of transmission LCoS

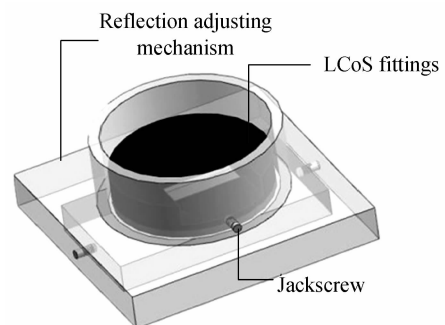


图 9 反射片 LCoS 位移调节机构
Fig. 9 Displacement regulating mechanism of reflex LCoS

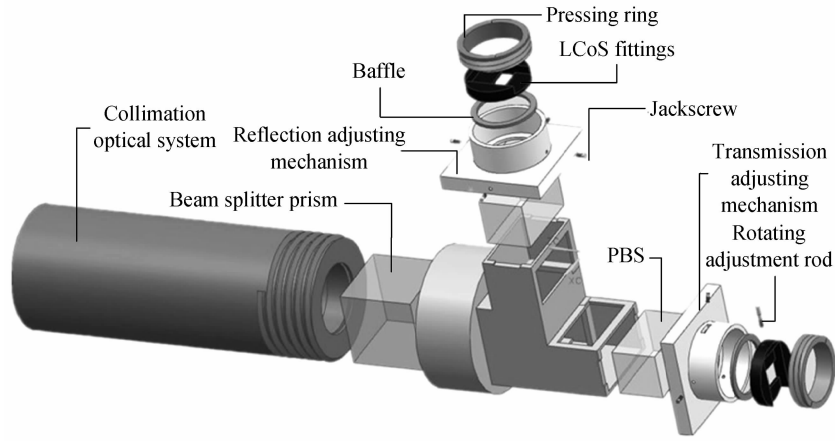


图 10 LCoS 光学引擎爆炸图
Fig. 10 Explosion diagram of LCoS optical engine

2.3 准直照明光学系统设计

照明系统是光学引擎的重要组成部分,主要功能是在满足设计谱段范围内提供足够的能量来模拟恒星的星等. 根据 LCoS 光学引擎使用条件的限定,为了有效降低系统杂散光,照明光学系统需要对准直角进行约束,控制在 $\pm 5^\circ$ 以内,同时保证足够大的辐照面积及辐照均匀度,因此主要的设计思路是:利用复合抛物面聚光器 (Compound Parabolic Concentrator, CPC) 对具有一定发散角的白光 LED 灯源二次配光,通过望远系统实现对光线扩束及缩放出射角度的目的,并在扩束系统实焦点处集成复眼透镜,增强辐照面的均匀性^[13]. 整套照明系统构成组件如图 11 所示.

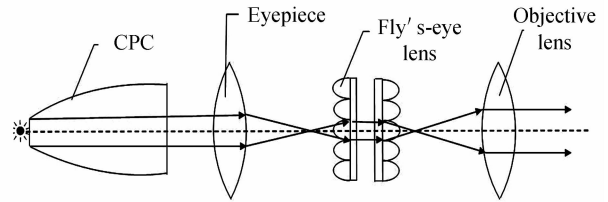


图 11 照明光学系统构成组件
Fig. 11 Component of lighting optical system

2.3.1 照明光学系统辐照度计算

光学系统是光能传递的媒介,如果传递过程中光能有损失,则把出射光能量和入射光能量的比值称为光学系统的透过系数 (Throughput) K . K 值永远小于 1, $(1-K)$ 称为损失系数. 光通量是单位时间内的能量,如果不考虑传递过程中的拦光、吸收、反射等损失,由能量守恒定律知,出射光通量 Φ' 等于入射光通量 Φ . 如果有损失则

$$\Phi' = K\Phi \quad (1)$$

辐照面光通量的计算即转化为 K 的求解. 动态星模拟器光路中的光学元件对于光能损耗都具有相应的贡献量,因此系统的通过率可以转化为各元件间通过率的乘积. 主要的光学元件包含 CPC 通过率、扩束系统通过率、偏振分光棱镜组通过率、LCoS 反射率及成像光学系统通过率组成,其中 CPC 对于光能的损耗是主要贡献量,其通过率由配光前后光线的发散角决定.

白光 LED 的最小发散角一般不小于 $\pm 60^\circ$, 而 CPC 是由两个抛物面拟合而成,对入射光线通过边缘光线原理实现出射光线角度的减小,在灯源半径尺寸已知前提下,经 CPC 配光后出射光线的角度与其长度相关,可表示为

$$L = \frac{a(\cos \theta + \sin \theta \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \quad (2)$$

式中 a 为焦平面 (即灯源) 半径, L 为系统长度, θ 为最大出射半角.

L/a 关于 θ 的函数如图 12 所示^[14-15].

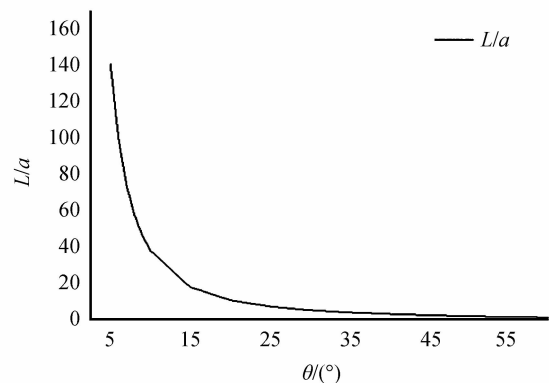


图 12 L/a 与 θ 的函数关系
Fig. 12 Function between L/a and θ

通过图 12 可以看出 θ 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内, L/a 变化幅度较大,综合体积与出射角度因素考虑,经 CPC 二次配光光线的出射角约束在 $\pm 15^\circ$ 。根据 CPC 对于 LED 光源配光的结果,可以得到 CPC 的光能通过率为

$$K_{\text{CPC}} = \frac{\varphi_{15}}{\varphi_{60}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{15} I_N \cos i \sin i di}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{60} I_N \cos i \sin i di} = \frac{\int_0^{15} \cos i \sin i di}{\int_0^{60} \cos i \sin i di} = 0.089 \quad (3)$$

式中: I_N 是 dS 法线方向的发光强度; i 为子午面内角度,即发光体的发散角; φ 为弧矢面内角度,即空间方位角。动态星模拟器中其他光学元件的通过率为器件本体特性,可以得到扩束系统透过率 $\tau_1 = 0.81$, 偏振分光棱镜组通过率 $\tau_2 = 0.25$ 、LCoS 反射率 $\tau_3 = 0.9$ 、成像光学系统通过率 $\tau_4 = 0.851$ 。对于星敏感器可识别的星图中最亮天体为 -1 等星,其辐照度为 $E_s = 4.2 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$,即为系统出光辐照度,因此可以得到 LCoS 辐照面的辐照度为

$$E' = \frac{E_s}{\tau_2 \tau_3 \tau_4} = 2.2 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

换算成光照度为 $E = 1.5 \times 10^{-4} \text{ lm/m}^2$ 。LCoS 的辐照面积为 $S = 1.296 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,因此可以得到 LCoS 光通量为

$$\varphi' = ES = 1.95 \times 10^{-7} \text{ lm} \quad (5)$$

则所需要 LED 光源所发出的光通量最小为

$$\varphi = \frac{\varphi'}{\tau_1 K_{\text{CPC}}} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ lm} \quad (6)$$

额定功率为 3W 的 LED 的光通量一般为 90 lm,远高于所需能量,考虑到灯源稳定性等因素,最终照明光学系统所选用的灯源为 CREE 公司型号为 XP-G 的白光 LED。

2.3.2 扩束系统设计

扩束系统采用望远系统结构,由物镜与目镜两组光学系统构成,主要特点是光学间隔为零,构成无焦系统,因此两组光学系统的孔径角相同,出射光束与入射光束的光焦度相比没有变化,仅为光束视场角度的变化,并用角放大率表示视场角的变化程度。望远系统的角放大率表示为

$$\gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{f_1'}{f_2} \quad (7)$$

式中: ω' 为目镜视场角, ω 为物镜视场角, f_1' 为物镜焦距, f_2 为目镜焦距。

为了实现缩小视场角的目的,需要将望远系统目镜的出瞳置于 CPC 的出光口,这样既能减小光束发散角,又能增大辐照面积。根据角放大率公式可得

$$\frac{f_1'}{f_2} = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = \frac{\tan 15^\circ}{\tan 5^\circ} = 3.06 \approx 3 \quad (8)$$

且两组光组的孔径角相同,即

$$\frac{D_1}{f_1} = \frac{D_2}{f_2} \quad (9)$$

设与 CPC 衔接的望远系统目镜口径 $D_2 = 12 \text{ mm} > 11.8 \text{ mm}$,则根据式(9)可得 $D_1 = \frac{f_1'}{f_2} \times D_2 = 36 \text{ mm}$ 。

望远系统的光学参量如表 2 所示。

表 2 望远系统光学参量

Table 2 The optical parameters of the telescope system

Name	Focal length/mm	D/f	Field angle/($^\circ$)
Eyepiece	30	1/2.5	± 15
Objective	90	1/2.5	± 5

由于该系统主要用于照明,不需要针对成像要求进行专门的像差校正,主要考虑光线在传递过程中能量的损耗,即在镜头设计时避免或者降低渐晕的形成。设计中需要简化光学系统结构,缩小照明系统的体积。考虑到 LCoS 工作的光谱范围为 $400 \sim 700 \text{ nm}$,为了避免由照明光学系统所带来的色差影响到成像光学系统的色差矫正,因而需要对照明光学系统的光组采用消色差结构作为设计的初始结构。

目镜光学系统采用三胶合透镜密接平凸透镜,密接透镜可以最大程度保证视场内充满入瞳的光线通过系统不产生渐晕.像差方面,三胶合透镜可以保证色差的校正,而正透镜分担一定的光焦度,降低高级球差,从而减小色球差的影响.目视光学系统的阴影图如图 13(a).物镜采用双胶合透镜,主要保证色差的校正,其阴影图如图 13(b).

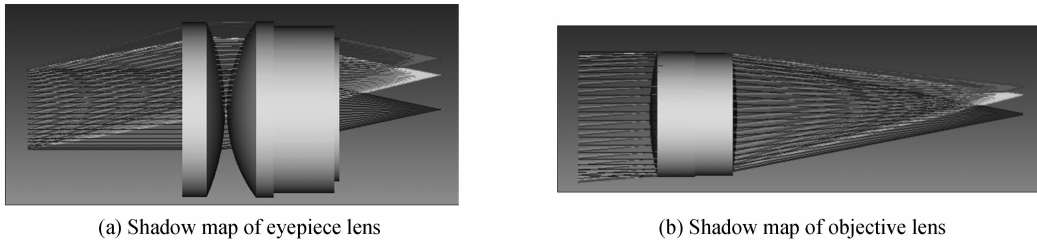


图 13 望远系统阴影图
Fig. 13 Shadow map of telescope system

2.3.3 照明光学系统设计结果

整套照明光学系统渲染图如图 14.

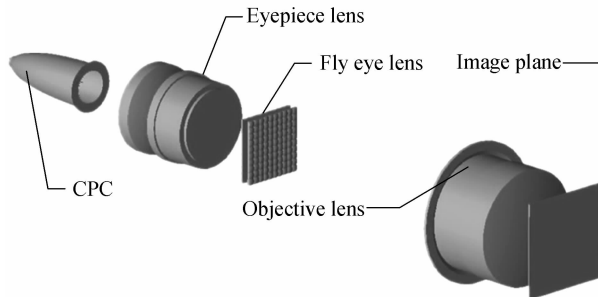


图 14 照明光学系统渲染图
Fig. 14 Render graph of lighting system

利用 200 000 条光线进行光线追迹,仿真得到的照明系统出射光线的辐射图如图 15.

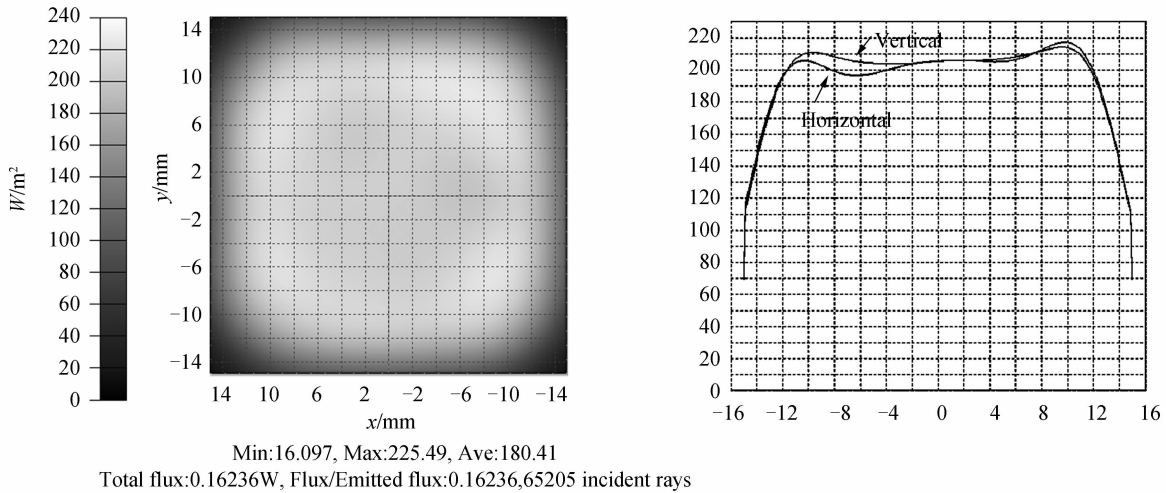


图 15 照明系统辐射图
Fig. 15 Irradiance map of lighting system

通过仿真结果可以得到在 18 mm×18 mm 的范围内光强的不均匀度为

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = 7.3\% \quad (10)$$

式中 I_{\max} 为最大光强, I_{\min} 为最小光强. 根据所得结论可以判断设计的照明系统可以实现均匀照明.

照明系统的配光曲线如图 16. 图 16 中纵坐标表示相对能量, 横坐标表示光源发散角, 因此根据图像可以得到相对能量在 50% 的位置时, 光源的发散角为 $\pm 5^\circ$. 照明光学系统的原理样机如图 17.

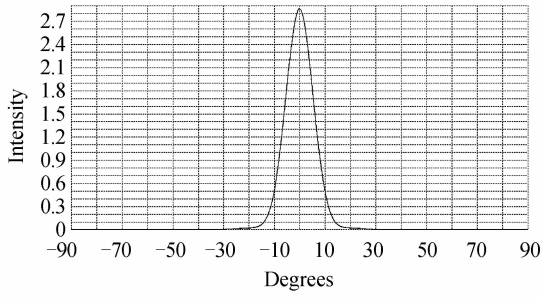


图 16 照明系统配光曲线

Fig. 16 Light distribution curve of lighting system

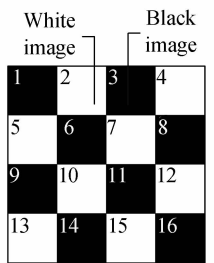


图 17 照明系统原理样机

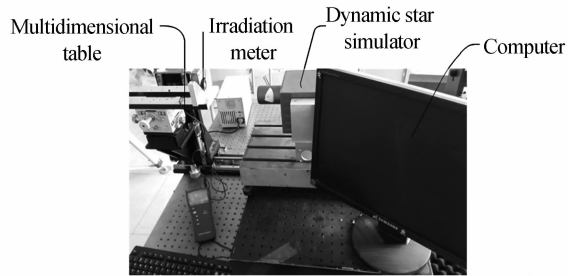
Fig. 17 Lighting system principle prototype

3 实验验证

优化 LCoS 光学引擎的目的是为了降低系统背景杂散光, LCoS 显示的黑色图像即为动态星模拟器的星图背景, 而背景能量强弱代表了杂散光的抑制程度, 因此其验证方法可依据图像对比度验证的方式. 具体的验证方法是: 将优化前及优化后的 LCoS 动态星模拟器分别显示黑白相间的格子图像, 将整幅图分成 16 个格子区域, 多次测量不同区域视角角下的辐照度, 测试原理如图 18(a), 实验现场如图 18(b).



(a) Testing principle



(b) Experiment site

图 18 辐照度测试实验

Fig. 18 Irradiance test

以优化前的白色图像辐照度作为基准进行配准, 对多次测量结果进行均值化处理, 绘制优化前后的黑白图像辐照度曲线如图 19.

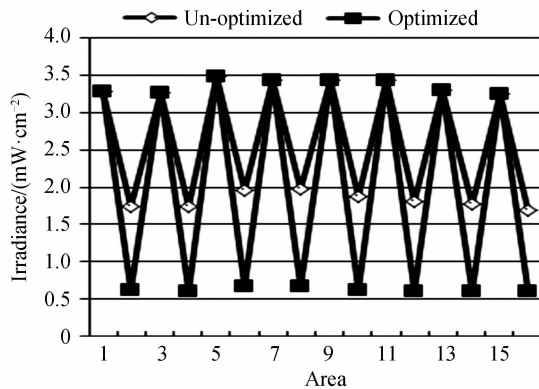


图 19 黑白图像辐照度曲线

Fig. 19 Irradiance curve of black and white images

对优化前后测试结果求解均方根, 得到黑白图像辐照度如表 3.

表 3 黑白图像辐照度

Table 3 Irradiance of black and white images

Name	The dynamic star simulator irradiance before optimized/(mW · cm ⁻²)		The dynamic star simulator irradiance after optimized/(mW · cm ⁻²)	
	White image	Black image	White image	Black image
	RMS	3.227	1.82	3.227

高对比度动态星模拟器与传统动态星模拟器相比,其杂散光能量降低的倍数为

$$\frac{E_{BN}}{E_{BO}} = \frac{1.82}{0.622} = 2.93 \quad (11)$$

式中: E_{BO} 为优化前黑色图像辐照度, E_{BN} 为优化后黑色图像辐照度.可以得到系统杂散光降低了 2.93 倍.光学引擎优化前与优化后的图像对比如图 20 所示.

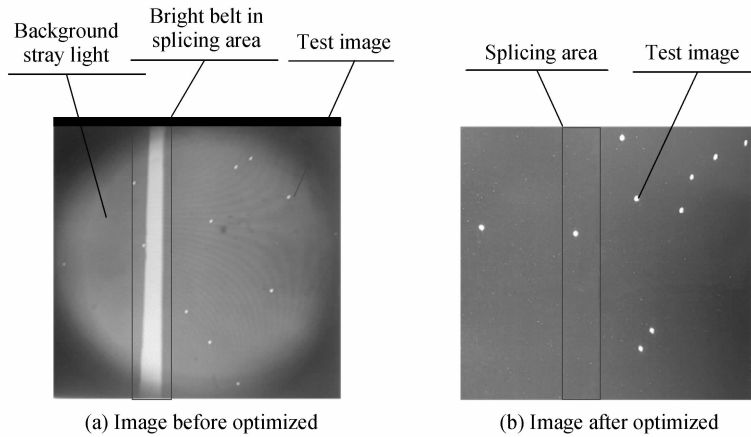


图 20 光学引擎测试采集图

Fig. 20 Text image of optical engine

图 20(a)为星敏感器对传统型动态星模拟器测试图像的采集图,采用星点作为测试图像,其中,两片的拼接位置存在拼接亮带,而图像背景也被照明光源点亮;而图(b)为优化后动态星模拟器的采集图,可以看到亮带已经消失,且背景中没有明显的光学噪声.使用 Matlab 对图 20 分别进行灰度分析,分析结果如图 21 所示.

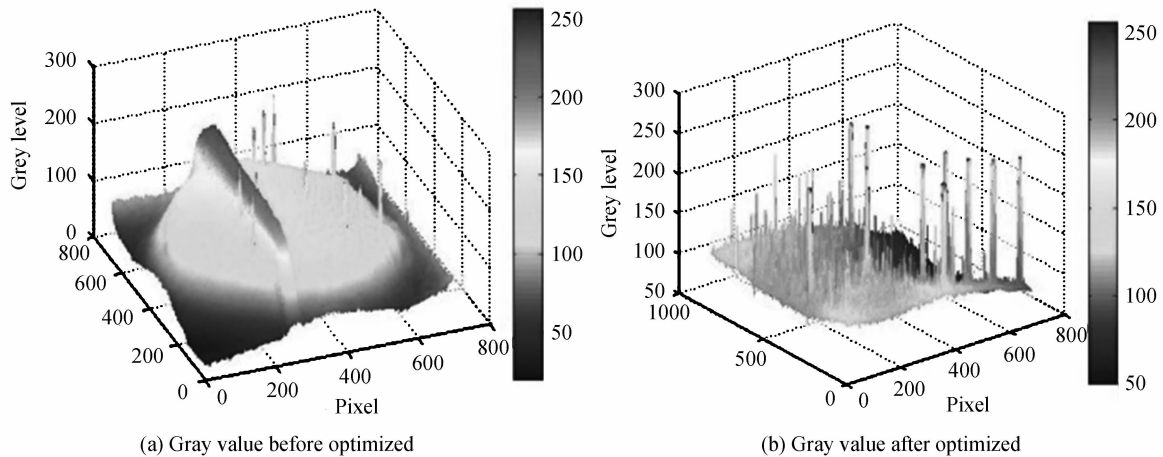


图 21 图像灰度值三维图

Fig. 21 Three-dimensional diagram of grey level

4 结论

从降低基于 LCoS 拼接动态星模拟器背景杂散光的问题出发,提出了一种光学引擎的优化方案,并对光学引擎的光机结构进行了设计.为实现小视场角的照明条件,对照明光源进行了设计,得到视场角小于 $\pm 5^\circ$ 、

不均匀性优于 8% 的准直光源. 通过对优化后的光学引擎进行测试, 实验结果发现杂散光降低 2.93 倍, 实现了基于 LCoS 拼接动态星模拟器背景杂散光抑制的目的, 降低了对于星敏传感器星点提取的影响.

参考文献

- [1] LI Lin, WAND Dong, TAN Lu-yang, *et al.* Optimization design and test for bracket of star sensor in micro-satellite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1352-1358.
李林, 王栋, 谭陆洋, 等. 微小卫星星敏传感器支架的优化设计与试验[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(6): 1352-1358.
- [2] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, JIANG Hui-lin, *et al.* Design of very high accuracy star simulator[J]. *Optics and Precision on Engineering*, 2011, **19**(8): 1730-1734.
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度度星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(8): 1730-1734.
- [3] ZHENG Ru, ZHANG Guo-yu, GAO Yue, *et al.* Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(9): 2144-2150.
郑茹, 张国玉, 高越, 等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(9): 2144-2150.
- [4] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, WANG Ling-yun, *et al.* Compact star simulator with very high accuracy[C]. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies, 2012: 84171J.
- [5] GONG Yan, HU Yan-ning, ZHAO Yan. Design of a mini star simulator based on digital optical processing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1698-1703.
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): 1698-1703.
- [6] LIU Zeng-yi, ZHAO Bo-rui, XING Fei. Design and error analysis of a high accurate star simulator based on optical splicing technology[J]. *Instrumentation*, 2015, **2**(1): 44-56.
- [7] CHEN Qi-meng, ZHANG Guo-yu, SUN Xiang-yang, *et al.* Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(4): 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**(4): 0716003.
- [8] LI Bao-hua, LIU Guo-liang, LIU Rui, *et al.* Key techniques of star sensors for celestial navigation[J]. *Optics and Precision on Engineering*, 2009, **17**(7): 1615-1620.
李葆华, 刘国良, 刘睿, 等. 天文导航中的星敏传感器技术[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(7): 1615-1620.
- [9] ZHANG Wen-ming, LIN Ling, HAO Yong-jie, *et al.* Design of a dynamic display system for star map in small-sized star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(5): 11-14.
张文明, 林玲, 郝永杰, 等. 小型星模拟器中星图动态显示系统的设计[J]. 光电工程, 2000, **27**(5): 11-14.
- [10] MENG Yao, ZHANG Guo-yu, LIU Shi, *et al.* Design of high-precision and high-dynamics star simulators based on LCoS splicing[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2016, **46**(2): 621-626.
孟遥, 张国玉, 刘石, 等. 基于 LCOS 拼接的高精度高动态星模拟器设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, **46**(2): 621-626.
- [11] LEI Hua, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, *et al.* Optical butting system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, **31**(6): 1213-1217.
雷华, 徐之海, 冯华君, 等. 光学拼接成像系统[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(6): 1213-1217.
- [12] YANG Jia-qiang, CHENG De-wen, WANG Qing-feng, *et al.* Design of a novel wide view-field angle anti-stray-light fundus camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1122002.
杨加强, 程德文, 王庆丰, 等. 新型大视场消杂光眼底相机光学系统的设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(11): 1122002.
- [13] MENG Yao, ZHANG Guo-yu, SUN Gao-fei, *et al.* Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2016, **24**(3): 511-520.
孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(3): 511-520.
- [14] WANG Yi-qing, LI Xiang-ning, HUANG Hui, *et al.* Reflector design method based on compound parabolic concentrator (CPC) for big size LED[J]. *Optical Technique*, 2014, **40**(5): 450-453.
汪宇青, 李湘宁, 黄慧, 等. 一种基于复合抛物面聚光器的面向大尺寸 LED 的反射器设计方法[J]. 光学技术, 2014, **40**(5): 450-453.
- [15] ZHAO Hui-fu, LIU Hua, SUN Qiang, *et al.* Design of RIXR LED collimatine system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1472-1479.
赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(7): 1472-1479.