双 DMD 红外双波段场景模拟器光机结构设计*

潘 越,徐熙平,乔 杨
(长春理工大学光电工程学院 长春 130022)

摘 要:针对常规红外双波段场景模拟器多基于单数字微镜器件(DMD)设计、不能对两个波段进行差异化调制、只满足仿真测试的工作波段需求、实用性差的问题,提出了一种基于双 DMD 的双通道、共口径、两档变焦、结构紧凑的红外中/长波场景模拟器,并对投影系统、照明系统、双色合束镜等主要部分进行了详细的光机结构设计。光学引擎采用远心光路直接照明 DMD 靶面,利用空间立体式布局来避免不同光路间的干扰,且使用两块小型金属平面反射镜压缩照明光路以提高系统集成度;采用半运动学弹性夹持方式固定合束镜,重点计算了弹簧夹为得到最小预载应发生的偏转量及其在材料中形成的弯曲应力;利用 MATLAB 求解出两波段黑体的工作温度,并拟合出经光学系统后两波段辐射出射度与全红外波段黑体辐射出射度的比例关系 $\psi(T)$ 曲线。测试结果表明,黑体温度为 850 K 时达到最高表观温度要求,中波图像对比度为 250∶1,长波图像对比度为 14∶1,满足现阶段红外中/长波场景模拟器的使用要求。

关键词: 半实物仿真;红外双波段;场景模拟;双数字微镜器件;光机结构
中图分类号: TN216 TH703 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 140.30

Opto-mechanical structural design for two-DMD infrared dual-band scene simulator

Pan Yue, Xu Xiping, Qiao Yang
(*School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: Regular infrared dual-band scene simulators are mostly designed with single DMD, which cannot modulate the two wave bands severally. The single DMD based design can only meet the requirements of working wave band, but is not that practical. To solve this problem, a dual-DMD based dual-channel co-aperture switch-zoom compact-structure MWIR (Medium Wave Infrared)/LWIR (Long Wave Infrared) scene simulator is designed. The optical-mechanical structure of its main parts, including projection system, illumination system, and dichroic beamcombiner, are designed in detail. The optical engine adopts telecentric system to illuminate DMD target surface directly, which uses vertical space overall arrangement to avoid interference from different light path. Moreover, the engine uses two small-size metal plane mirrors to compress illumination light path, so that system integration degree is increased. The beamcombiner is fixed in half- kinematics elastic way, we calculate pinchcock's deflection for the least preload, and its bending stress formed in material. Working temperature of black bodies in two wave bands can be calculated with Matlab, which also fits the proportional relation $\psi(T)$ curve of after-optical-system radiation remittance of two wave bands and black body radiation remittance of overall infrared wave band. The simulation testing shows that when black body temperature reaches 850 K, it meets the highest apparent temperature requirement. The contrast ratio of mid-wave image is 250∶1, and the contrast ratio of long-wave image is 14∶1, which satisfies the operating requirements of infrared mid/long-wave scene simulator at the present stage.

Keywords: hardware-in-the-loop; infrared dual band; scene simulation; two digital micromirror devices (DMDs); opto-mechanical structure

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01
*基金项目:国家自然科学基金(61605016)、吉林省科技发展计划(20160204062GX)项目资助

0 引　　言

红外中/长波成像制导通过比对目标和背景在两波段图像中光谱辐射强度分布的差异来识别真实目标,既继承单波段成像制导优点又进一步提升了导弹的抗干扰和探测能力[1]。半实物仿真实验系统是红外成像制导系统的性能测试和评估设备[2-3],红外双波段场景模拟器作为其核心器件,应保证待检制导系统在半实物仿真实验中所观察场景的红外光谱特征、空间特征、时域特征、辐射强度特征等与真实场景相一致[4]。

目前,红外双波段场景模拟器一般分为两种:一种是基于离轴三反结构设计,虽然不涉及色差校正问题,但使用黑体照明靶标形成红外双波段静态场景的方法已不适于模拟复杂战场环境[5-6];另一种是基于单数字微镜器件(digital micromirror device,DMD)设计,虽然可以实现红外双波段动态场景模拟,但不能对两个波段进行差异化调制,同样无法满足仿真测试需求,实用性差[7-8]。本模拟器采用远心光路直接照明 DMD 靶面,利用双 DMD 对不同波段进行差异化调制,由双色合束镜进行光路耦合,且可实现两档变焦。本文结合保证变焦过程稳定性,提高整体集成度及装调效率的思想,重点完成了模拟器光机结构部分的设计。

1 双 DMD 模拟器的组成及技术参数

本文所设计的双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器主要由两个黑体光源、长波和中波照明系统及三角形支架、投影系统及镜头支架、双色合束镜、驱动组件(小型步进电机和编码器)、高精密六维组合位移台、长波 DMD 组件、中波 DMD 组件、高精密电控平台(加装光栅尺)等组成,其总体结构如图 1 所示。

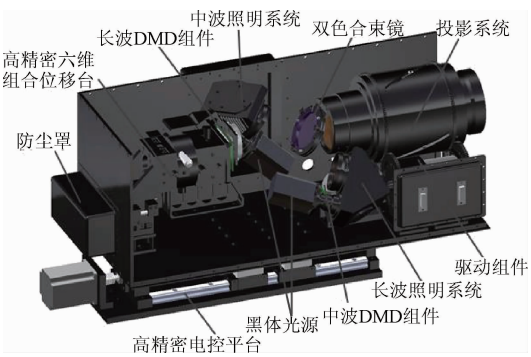


图 1　双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器组成

Fig. 1　Constitution of two-DMD zoom infrared dual-band scene simulator

两黑体光源发出的光经照明光学系统后均匀照射在两 DMD 上,被调制后的光经双色合束镜合束后进入投影系统,被投影系统以平行光投射到待检导引头入瞳处,以模拟无穷远场景。投影系统可实现两档变焦,通过编码器和步进电机进行变焦过程的闭环控制,高精密电控平台加装了光栅尺,用于代替补偿组补偿变焦后出瞳位置的改变,其位移精度为 2 μm。合束镜对 8 ~ 12 μm 长波红外高透,对 3.7 ~ 4.8 μm 中波红外高反,其反射面法线与投影系统光轴成 30°角。因此,中波 DMD 固定于倾斜角度为 30°的三角形支架上,长波 DMD 固定于高精密六维组合位移台上,以在装调过程中精确调整长波 DMD 靶面相对于中波 DMD 靶面的空间位置。由于 DMD 微镜沿对角线做 ±12°的翻转,为保证照明光束的主光线以 24°入射,长波照明系统固定于倾斜角度为 45°的三角形支架上,中波照明系统固定于倾斜角度分别为 45°和 60°的复合三角形支架上,所有三角形支架均为铝制结构,并开有规则排列的通槽,在保证稳固装配的前提下减轻重量,角度加工精度控制在 ±1′,与照明系统接触面的平整度控制在 ±0.01 mm。

根据双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器的使用要求及各系统间的匹配关系,模拟器的关键技术参数如表 1 所示。

表 1　双 DMD 模拟器的技术参数

Table 1　Technical parameters of two-DMD simulator

技术参数	设计要求
最高表面温度/K	中波≥600;长波≥400
工作波段/μm	3.7 ~ 4.8;8 ~ 12
视场角	±3.75°; ±1.875°
焦距/mm	133.6;267.2
变焦比	2 ×
图像对比度	200∶1 中波;10∶1 长波

2 双 DMD 模拟器光学设计

双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器采用远心光路直接照明 DMD 靶面,照明方式为柯勒照明,为便于光机结构设计和系统装调,使用了两块平面反射镜压缩照明光路。两波段照明系统除滤光片外均相同,滤光片为 3 mm厚的薄平行平板,只起到滤除非工作波段光谱的作用。投影光学系统采用逆向设计,引入两非球面进行色差校正[9],满足与照明光学系统的光瞳衔接原则。模拟器各视场下的光学设计结果如图 2 所示,各视场下双波段投影光学系统的调制传递函数(modulation transfer function,MTF)曲线如图 3 所示。

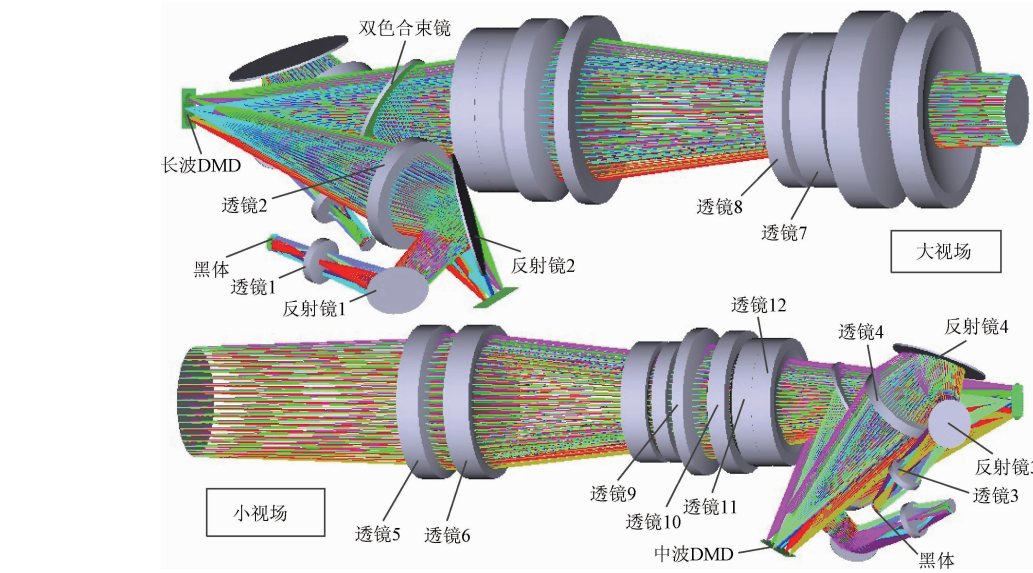
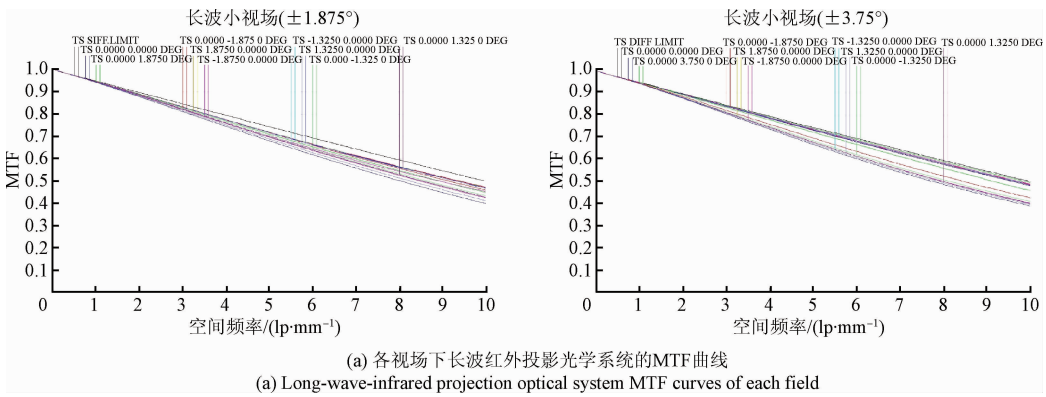


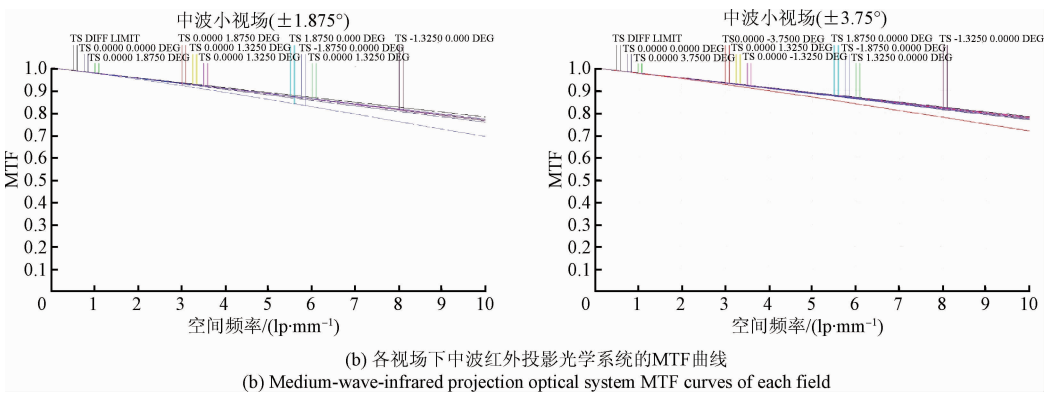
图 2 双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器光学系统

Fig. 2 Optical system of two-DMD zoom infrared dual-band scene simulator



(a) 各视场下长波红外投影光学系统的MTF曲线

(a) Long-wave-infrared projection optical system MTF curves of each field



(b) 各视场下中波红外投影光学系统的MTF曲线

(b) Medium-wave-infrared projection optical system MTF curves of each field

图 3 各视场下双波段投影光学系统 MTF 曲线

Fig. 3 Dual-band projection optical system MTF curves of each field

导引头系统的红外探测器像元数为 384 × 288，像元尺寸为 35 μm，对应考察空间截止频率为 14 lp/mm 处的传递函数，由于相同视场下投影系统焦距约为导引头系统焦距的两倍，所以考察投影系统在 10 lp/mm 处的传递函数即可[10]，由图 3 可知，长波投影系统大视场和小视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.4，中波投影系统大视场和小视场在 10 lp/mm 处的 MTF 值优于 0.7，两种情况下各视场 MTF 曲线均接近衍射极限情况，成像质量较

好。表 2 所示为 CODEV 软件所给出的模拟器投影光学系统公差分析结果,用于指导结构设计及系统装调。

表 2　投影光学系统公差

Table 2　Tolerance of projection optical system

透镜	面倾斜 χ'	透镜倾斜/mm	透镜偏心/mm
5	1	0.01	±0.03
6	0.5	0.01	±0.03
7	1	0.01	±0.025
8	1	0.01	±0.03
9	0.5	0.01	±0.03
10	1	0.01	±0.02
11	1	0.01	±0.03
12	1	0.01	±0.03

3　双 DMD 模拟器结构设计

3.1　照明系统结构设计

两波段照明系统的结构设计结果如图 4 所示,5 个光学元件的光轴共面,透镜 1 与透镜 2 及滤光片的光轴平行,平面反射镜 1 与平面反射镜 2 光轴垂直,且与透镜光轴分别成45°。黑体为端面固定,通过转接法兰结构和垫圈与镜筒 1 固连,装调时可以通过修配垫圈来控制黑体辐射面法线与透镜 1 光轴的相对位置精度。滤光片与透镜 2 以插片式依次安装于镜筒 2 内部,各透射式光学元件的空气间隔均通过修配相应隔圈来控制,并用压圈锁紧。反射镜与镜座间为挠性安装,通过 4 个 90°均布的螺纹孔固连,其靠近底部位置加工有一个环形狭缝,分离安装应力,底面加工有一个圆形凹槽,在减轻重量的同时,也减少了抛光面积[11]。镜筒 1、镜筒 2、镜座 1、镜座 2 分别以法兰结构固连于三角形盒体上。

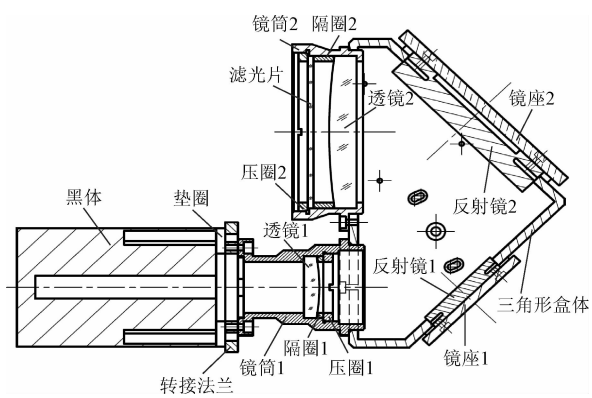


图 4　照明系统结构

Fig. 4　Structure of illumination system

3.2　投影系统结构设计

3.2.1　投影系统总体结构

投影系统的总体结构如图 5 所示,投影镜头和传动组件分别通过各自固定支架与模拟器底板固连,变焦过程的传动方式为渐开线直齿圆柱齿轮啮合传动。为减小轮齿啮合传动过程中的空回误差,主动轮采用剖分式设计。

图 5　投影系统总体结构

Fig. 5　General structure of projection system

3.2.2　投影镜头结构设计

投影镜头的轴向总长为 251 mm,结构设计结果如图 6所示,主要包括前固定组、套筒、凸轮筒、变倍组、变焦支架、导向柱、圆柱导轨、后固定组等。镜筒 1、套筒、镜筒 3 分别加工有定位台阶面,相互对准后通过端面法兰结构将前、后固定组与套筒固连,套筒加工有沿周向120°分布的 3 个水平辅助导向槽,变倍组沿光轴运动距离为 ±87 mm。套筒与凸轮筒为配对部件,套筒外侧与凸轮筒内侧分别加工有凸环状经阳极硬化处理的轴承面,两者间为间隙配合,间隙控制在 7 ~ 10 μm 为宜[12]。凸轮筒两端加工有外齿轮,与传动机构外齿轮啮合,导向柱与变焦支架固连,衬套为聚四氟乙烯材料,装配在凸轮筒的变倍曲线槽内,电机带动凸轮筒做周向转动时,即实现变倍组的线性运动。

投影镜头的主导轨与变焦支架为孔轴配合关系,引导变倍组做轴向运动,辅助导轨与变焦支架为槽轴配合关系,约束变倍组绕光轴方向的转动,对于两档变焦系统配合间隙 Δd 控制在 ±5μm 内即可,所有滑动表面均经过阳极氧化处理,保证表面光洁度为 0.4μm,导向精度可表示为:

$$\delta = \pm \operatorname{arctg} \frac{\Delta d}{L} \tag{1}$$

由式(1)可知,当配合间隙一定的情况下,适当延长导向柱与变焦支架的配合长度 L 有助于提升导向精度,但 L 过长则会使直线度、平行度、同轴度等形位公差难于控制,因此当变焦支架的厚度一定时,应尽量使变倍组的质心 X_{cg} 位于配合长度 L 的范围内,以最大程度的避免变倍组移动过程中出现倾覆、卡死现象。透镜 7 材料为 AMTIR1,密度为 4.49 g/cm^3,透镜 8 材料为 ZnSe,密度为 5.27 g/cm^3,镜筒 2、压圈、隔圈材料为硬铝,密度约为红外材料的一半,且均为薄壁小尺寸结构,因此主要计算透

镜质心位置即可，X_{cg}可由下式计算得出[13]：

$$X_{cg} = \sum_{i=1}^{3} (X'_i M_i)/M_{lens} \quad (2)$$

式中：X'_i为透镜每一部分的质心位置，M_i为透镜每一部分的质量，M_{lens}为透镜总质量。

透镜 7 质心和透镜 8 质心相对于变倍组坐标原点的位置分别为 22.44 和 4.545 mm，透镜 7 的质量为 892.49 g，透镜 8 质量位 253.21 g，则可根据杠杆原理计算变倍组的相对质心位置为 13.92 mm，由此即可确定变焦支架与镜筒 2 的配合位置。

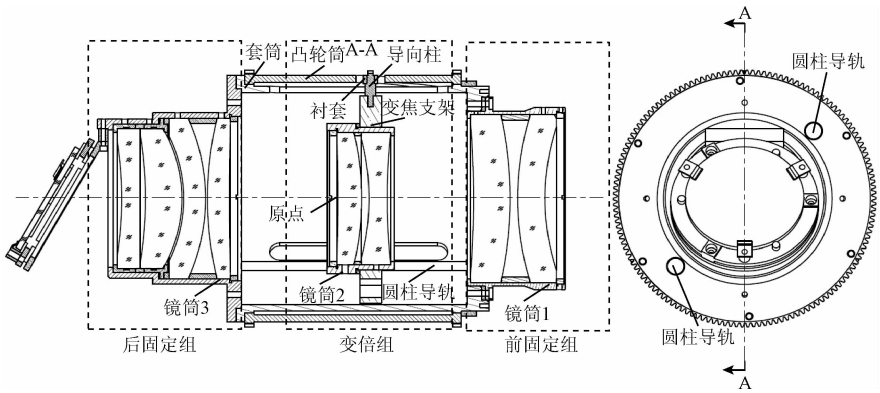


图 6 投影镜头结构

Fig. 6 Structure of projection lens

由图 6 可以看出，透镜 10、透镜 11、透镜 12 间的空气间隔过小，无法使用传统的隔圈摆放形式，因此将透镜 11、透镜 12 胶粘于镜座中，镜座侧表面加工有 60°均布的通孔，内部垂直台阶面延圆周加工一个 1 mm 宽的环形沟槽，有助于减少胶层溢出。镜座 1 加工有一个垂直台阶面，隔圈 2 套在镜座 1 上，隔圈 3 的一部分套在透镜 11 上，另一部分套在透镜 12 上，以此控制空气间隔。此外，对于曲率半径较大的透镜，光机接触界面均设计为相切面，在施加相同轴向预载的前提下相切界面产生的接触应力相较于尖角界面将大大减少[14-15]。圆柱导轨、套筒、凸轮筒材料为 40Cr，其余结构件材料为硬铝，表 3 所示为双 DMD 模拟器各主要材料的物理性质。

表 3 双 DMD 模拟器主要材料的物理性质

Table 3 Physical property of primary materials of two-DMD simulator

名称	密度/(g·mm^{-3})	热胀系数/($\times 10^{-6}$/K)	杨氏模量/GPa	泊松比
Ge	5.32	6.2	10.37	0.28
Si	2.33	2.5	13.1	0.28
ZnS	4.08	4.6	7.45	0.29
AMTIR1	4.49	4.49	2.2	0.266
ZnSe	5.27	5.27	7.03	0.28
40Cr	7.85	7.85	205.8	0.3
铝 6061	2.68	23.6	68.2	0.332
3M2216	1.47	102	68.2	0.43
RTV	–	236	0.696	0.45

3.2.3 双色合束镜结构设计

双色合束镜在固定时作为柔性板考虑，采用半运动学安装方式，被 3 个沿周向 120°分布的弹簧夹压靠在镜座的一侧衬垫上，设计结果如图 7 所示。假设合束镜法线为 Z 轴，这种设计约束了沿 Z 轴的平移和绕 X 轴、Y 轴的旋转，仅依靠摩擦力限制绕 Z 轴旋转和沿 X 轴、Y 轴的平移，由于合束镜对这些运动并不敏感，所以采用这种固定方式可行。为避免合束镜的过量横向移动，使用了 3 个聚四氟乙烯材料的限位销，合束镜与限位销为间隙配合。

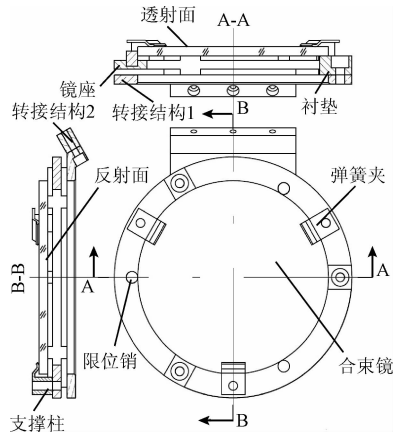


图 7 双色合束镜结构

Fig. 7 Structure of dichroic beamcombiner

弹簧夹设计为悬臂梁式，其施加的最小预载作用力应为：

$$F_{min} = mf_s \sum a \quad (3)$$

式中:m 为双色合束镜质量,f_s 为安全系数,$\sum a$ 为在预载作用力方向上的所有动、静态加速度的矢量合。具体如图 8 所示。

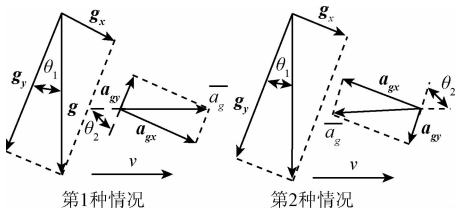


图 8　双色合束镜运动过程中承受的矢量加速度和

Fig. 8　Vector acceleration sum of dichroic beamcombiner moving process

合束镜工作过程中主要承受重力加速度 g 和平台启动时的瞬时加速度 $\overline{a_g}$,根据运动方向的不同 $\sum a$ 有两种情况,由图 8 可以看出,第 2 种情况所需最小预载要大于第 1 种情况,因此按第 2 种情况计算,则式(3)可表示为:

$$F_{\min} = mf_s(g \cdot \cos\theta_1 + \overline{a_g} \cdot \cos\theta_2) \tag{4}$$

根据合束镜法线与投影镜头光轴的夹角可知 $\theta_1 = 30°$,$\theta_2 = 60°$,g 取 9.8 m/s^2,平移台的最大移动速度为 0.04 m/s,将加速时间近似为 1 s,则 $\overline{a_g} = 0.04$ m/s^2,通常情况下取安全系数 $f_s = 2$,即施加预载为所要克服的动态载荷的两倍,ZnSe 的密度为 5.27 g/cm^3,合束镜的厚度和半口径分别为 3 和 33 mm,则可计算 $F_{\min} = 0.893$ N,为得到最小预载,3 个弹簧夹在松弛状态下所需偏转量 Δ 为:

$$\Delta = (1 - v_M^2)(4F_{\min}L^3)/(E_m bt^3 N) \tag{5}$$

合束镜质量约为 52.5 g,弹簧夹材料为硬铝,其中 v_M 为泊松比,E_m 为弹性模量(见表 3),弹簧夹自由长度(固定结构边缘与合束镜上接触区最近边缘间距离)L = 8 mm,宽度 b = 10 mm,厚度 t = 1 mm,N 为弹簧夹数目,由此可计算每个弹簧夹所需偏转量为 8×10^{-4} mm,此偏转量在材料中形成的弯曲应力为:

$$S_B = 6F_{\min}L/(bt^2 N) \tag{6}$$

由式(6)计算材料中的弯曲应力为 1.428 8 MPa,远小于铝材料最小屈服强度的一半 27 MPa,设计合理。

合束镜的底面如果直接放在镜座支撑面上,则必须要保证支撑面与合束镜的平面度一致,否则合束镜会承受额外的弯曲力矩,使用局部小衬垫作为光机接触面将大大降低这种情况发生的可能性。

3.3　两波段照明系统黑体温度计算

双 DMD 变焦红外双波段场景模拟器的最大表观温度取决于黑体光源的工作温度,长波范围内所要模拟的最大表观温度≥400 K,中波范围内所要模拟的最大表观温度≥600 K,黑体全光谱辐射出射度为:

$$M_e(T) = \varepsilon \cdot c_1 \int \lambda^{-5}[\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \mathrm{d}\lambda \quad \mathrm{W \cdot m^{-3}} \tag{7}$$

式中:M_e 为全红外波段黑体辐射出射度,T 为热力学温度,λ 为波长(单位为 m),ε 为黑体辐射效率,c_1 为 $3.741\ 5 \times 10^{-16}$ W·m^2,c_2 为 $1.438\ 8 \times 10^{-2}$ m·K。

传递过程中的能量损耗主要发生在 4 个部分:DMD、合束镜、透镜及平面反射镜。根据 TI 公司提供的 DMD 技术参数,可以计算 DMD 在中波范围内的能量利用率为 0.598 7,在长波范围内的能量利用率为 0.457 1,光学元件均镀有增透膜或增反膜,透射及反射效率均取 0.98,由此可计算模拟器的长波能量利用率 ξ_{LWIR} 为 0.358 7,中波能量利用率 ξ_{MWIR} 为 0.474 6。

经光学系统后中波范围内的辐射出射度为:

$$M_{\mathrm{proj_MWIR}}(T) = \xi_{\mathrm{MWIR}} M_e(T) = \xi_{\mathrm{MWIR}} C_1 \varepsilon \int_{3.7\times10^{-6}}^{4.8\times10^{-6}} \lambda^{-5}\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]^{-1} \mathrm{d}\lambda,$$

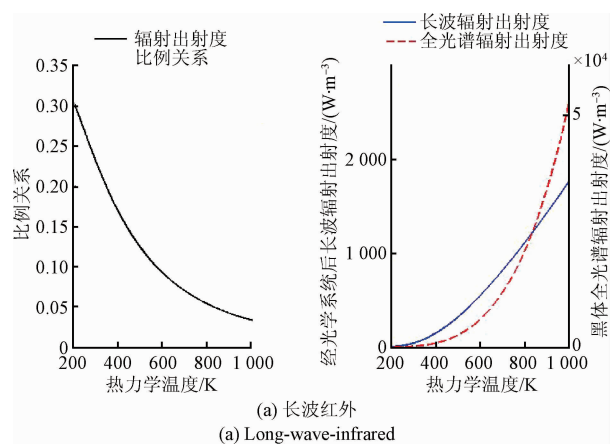
$$\psi_{\mathrm{proj_MWIR}}(T) = \frac{M_{\mathrm{proj_MWIR}}(T)}{M_e(T)} \tag{8}$$

经光学系统后长波范围内的辐射出射度为:

$$M_{\mathrm{proj_LWIR}}(T) = \xi_{\mathrm{LWIR}} M_e(T) = \xi_{\mathrm{LWIR}} C_1 \varepsilon \int_{8\times10^{-6}}^{12\times10^{-6}} \lambda^{-5}\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]^{-1} \mathrm{d}\lambda,$$

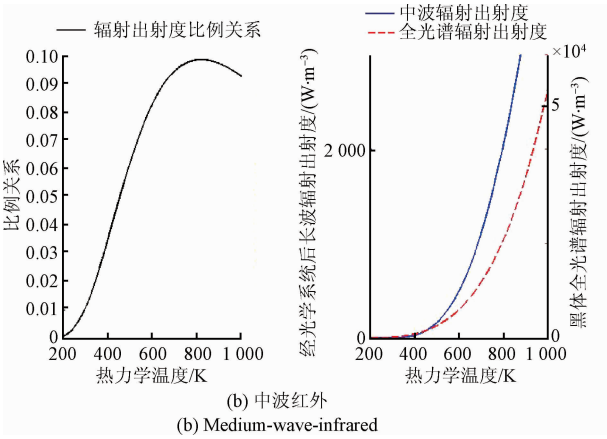
$$\psi_{\mathrm{proj_LWIR}}(T) = \frac{M_{\mathrm{proj_LWIR}}(T)}{M_e(T)} \tag{9}$$

式(8)和(9)中 $\psi(T)$ 分别为随温度变化的经光学系统后中、长波辐射出射度与全红外波段黑体辐射出射度的比值函数。图 9 所示分别为 8 ~ 12 μm 长波、3.7 ~ 4.8 μm中波、黑体温度变化为热力学温度 200 ~ 1 200 K 时,利用 MATLAB 软件所仿真出的经光学系统后两波段辐射出射度与全红外波段黑体辐射出射度的比例关系 $\psi(T)$ 曲线。



(a) 长波红外

(a) Long-wave-infrared



(b) 中波红外
(b) Medium-wave-infrared

图 9 ψ 随温度变化曲线

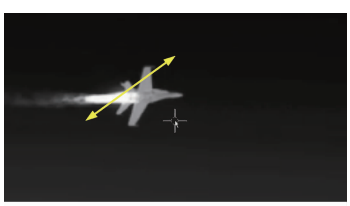
Fig. 9 Curves of ψ change with temperature

从图 9 中可以看出,随温度升高,$\psi(T)$ 曲线的比例峰值不断向短波方向移动,虽然关于光学系统的能量损耗近似为线性,但在特定谱段内的比例关系仍是一个关于黑体温度 T 的非线性函数。为了达到最大表观温度要求,在特定波段内的辐射出射度必须与等效黑体相同,等效黑体即发射率、吸收率均为 1 的理想黑体。通过查询 MATLAB 的计算结果可知,长波照明系统黑体温度应满足 $T\geqslant 550$ K,可实现最大表观温度≥400 K,考虑到相关参数的不确定因素影响,取 $1.5T=825$ K;中波照明系统黑体温度应满足 $T\geqslant 700$ K,取 $1.5T=1\ 050$ K,由此可知所选择黑体的温度上限应大于该值。

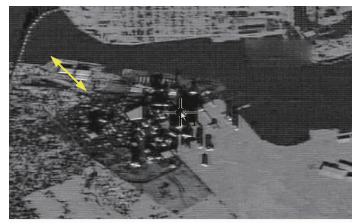
4 温度测试与实验结果分析

使用 FLIR-655SC 型长波热像仪和 FLIR-6750SC 型中波热像仪对两个工作波段进行性能测试。温度测试结果表明,当中波黑体温度为 800 K 时,最高表观温度为 635 K,达到指标要求,当长波黑体温度为 850 K 时,最高表观温度为 412 K,达到指标要求。

图 10(a)所示为中波热像仪在黑体温度为 800 K 时的采集结果,此时飞机尾焰部分的灰度达到饱和。为了更好地测试模拟器在长波范围内对于各种复杂环境的模拟能力,使用了 Vega Prime 软件所建立的虚拟场景,图 10(b)所示为长波热像仪在黑体温度为 800 K 时的采集结果。



(a) 中波热像仪
(a) Mid-wave thermal imager

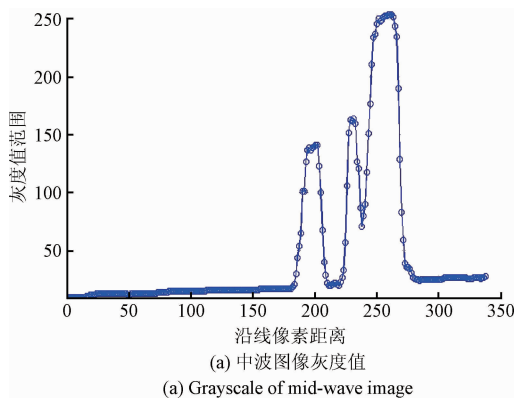


(b) 长波热像仪
(b) Long-wave thermal imager

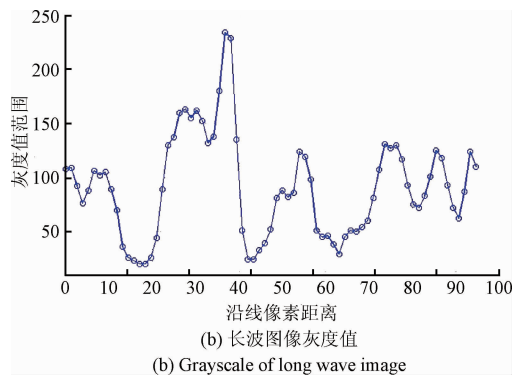
图 10 热像仪接收的测试图像

Fig. 10 Received test images of thermal imager

如图 11 所示,通过 MATLAB 软件获取两图中线段上的所有灰度值信息,该区域包含最亮和最暗部分,中波图像中最暗天空部分灰度值为 1,最亮的飞机尾焰部分灰度值为 252,长波图像中最亮部分灰度值为 238,最暗部分的灰度值为 17,则可知在该黑体温度下中波图像对比度近似为 250∶1,长波图像对比度近似为 14∶1,如果继续提升黑体温度,长波图像最亮部分灰度虽然会达到饱和,但是图像对比度将进一步下降,通过比对两幅图像可以直观看出,长波图像较中波图像总体发亮,这是受杂散辐射影响最直观的表现,模拟器对 DMD 靶面进行了局部制冷,在一定程度上抑制了杂散辐射能量[16]。



(a) 中波图像灰度值
(a) Grayscale of mid-wave image



(b) 长波图像灰度值
(b) Grayscale of long wave image

图 11 测试图像的灰度值采集结果

Fig. 11 Grayscale collection of test images

5 结　论

本文设计了由双 DMD 组件、双照明系统、投影系统、驱动组件、高精密六维组合位移台、高精密电控平台等组成的双通道、共口径、两档变焦红外中/长波场景模拟器。光学引擎架构采用柯勒远心光路直接照明 DMD 靶面,由双色合束镜进行光路耦合,结构紧凑且易于装调。采用半运动学安装方式固定双色合束镜,计算了弹簧夹为得到最小预载应发生的偏转量及此偏转量在材料中形成的弯曲应力,计算结果表明结构设计合理。利用 MATLAB 软件拟合出经光学系统后两波段辐射出射度与全红外波段黑体辐射出射度的比例关系 $\psi(T)$ 曲线,并求解出黑体温度变化范围应超过 1 050 K。仿真测试结果表明,当中波黑体温度和长波黑体温度分别为 800 和 850 K 时,达到最高表观温度要求;中波图像的对比度能达到 250∶1,长波图像的对比度能达到 14∶1,满足红外中/长波成像制导系统的半实物仿真测试需求,亦可应用于红外单波段成像制导系统的半实物仿真测试。

参考文献

[1] 李丽娟,白晓东,刘珂. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析[J]. 激光与红外,2013,43(9):1036-1039.
LI L J, BAI X D, LIU K. Analysis of the key technologies for dual color IR imaging guidance of air-to-air missile[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(9): 1036-1039.

[2] 吕帅,王金柱,仲伟君. 某型制导火箭弹弹道仿真[J]. 国外电子测量技术,2011,30(12):69-71.
LV SH, WANG J ZH, ZHONG W J. Trajectory simulation for guided rocket[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2011, 30(12): 69-71.

[3] 史源,邓小东,陈春红,等. 复合目标源模拟器控制系统的研制[J]. 电子测量技术,2013,36(1):60-63.
SHI Y, DENG X D, CHEN CH H, et al. Design of multiple target source simulator control system[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(1): 86-90.

[4] JOE L, GREG F, TOM D. Thermal resolution specification in infrared scene projectors[C]. Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling & Testing XXVI, 2015, 9452: 323-337.

[5] HU H, LIU J, FAN Z. Interaction of pupil offset and fifth-order nodal aberration field properties in rotationally symmetric telescopes [J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17986-17998.

[6] HU L L, ZUO B J, CHEN SH Q, et al . Multitarget compounding technique based on dimpled mirror[J]. Optics Engineering, 2012, 51(11): 3001.

[7] 张建忠,郭帮辉,谭向全,等. 高对比度中/长波红外双波段视景仿真系统光学设计及测试实验[J]. 红外与激光工程,2013,42(11):2895-2890.
ZHANG J ZH, GUO B H, TAN X Q, et al. Designed testing of high contrast ratio MW/LW infrared dual-bands scene simulation system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 2895-2890.

[8] 张宇,王文生. 制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜设计[J]. 光学学报,2013,33(5):216-221.
ZHANG Y, WANG W SH. Design of cooled Infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5):216-221.

[9] 张葆,崔恩坤,洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学 精密工程,2015,23(2):396-401.
ZHANG B, CUI EN K, HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV Common-path optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 396-401.

[10] QIAO Y, XU X P, PAN Y, et al. Research on DMD infrared scene projector with a high contrast ratio infrared prism design[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics , 2014, 125(22): 6855-6859.

[11] 程志峰. 航空相机反射镜支撑结构设计[J]. 仪器仪表学报,2014,35(6):87-90.
CHENG ZH F. Mechanical design of support structure of reflector in aerial camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 87-90.

[12] 艾华. 航空变焦可见光镜头结构设计与检测[J]. 仪器仪表学报,2014,35(6):107-110.
AI H. Structure design and test of aviation zoom visible lens[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 107-110.

[13] 潘越,徐熙平,乔杨. 8 ~ 12 μm 红外动态热像模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1854-1859.
PAN Y, XU X P, QIAO Y. Opto-mechanical structural design for 8-12 μm infrared dynamic thermal image simulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(8):1854-1859.

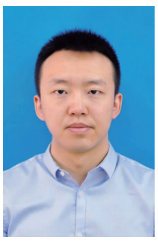
[14] 孙向阳,张国玉,王大轶,等. 大尺寸高精度星模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2121-2126.
SUN X Y, ZHANG G Y, WANG D Y, et al. Opto-mechanical structure design of large-scale and high precision star simulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2121-2126.

[15] 邵帅. 多波段共口径红外系统光机热一体化设计[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):387-393.
SHAO SH. Integrated design of optical-mechanism and heat for shared aperture infrared system with multi-spec-

trum band[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 387-393.

[16] 李延伟,张洪文,程志峰,等. 隔热材料在高空光学遥感器热控系统中的应用[J]. 仪器仪表学报,2013, 34(12):44-47.
LI Y W, ZHANG H W, CHENG ZH F, et al. Application of insulation material in thermal control system of altitude optical sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 44-47.

作者简介



潘越(通讯作者),分别在 2012 年和 2017 年于长春理工大学获得学士学位和博士学位,现为长春理工大学讲师,主要研究方向为光电系统的总体技术及光机结构设计。
E-mail:jilinpy@163.com

Pan Yue (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Changchun University of Science and Technology in 2012 and 2017. Now he is a lecturer in Changchun University of Science and Technology. His main research interests include overall technology of electro-optical system and opto-mechanical structural design.

徐熙平,分别在 1993 年和 1999 年于长春光学精密机械学院获得学士学位和硕士学位,2004 年于长春理工大学获得博士学位,现为长春理工大学教授,主要研究方向为光电检测技术与质量控制。
E-mail:xxp@cust.edu.cn

Xu Xiping received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics in 1993 and 1999, respectively, and received his Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology in 2004. Now he is a professor in Changchun University of Science and Technology. His main research interests include opto-electronic test technology and quality control.