# 基于双DMD的红外场景投影仪的结构设计及 有限元分析

李俊娜1, 高教波1, 杨东来2, 胡 煜1, 吴江辉1, 郑雅卫1, 袁 良1, 孟合民1

<sup>1</sup>西安应用光学研究所第六研究室,陕西 西安 <sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所光学定向与瞄准技术室,陕西 西安

收稿日期: 2023年8月11日; 录用日期: 2024年8月20日; 发布日期: 2024年9月12日

#### 摘要

红外场景投影仪能够模拟多种类型的目标与背景,对光电探测系统进行动态测试评估。为提高中波红外场景投影仪帧频速度和灰度等级,提出了一种基于双DMD (数字微反射器件)的设计方案。根据光学系统的特点及中波红外投影仪使用环境,对总体结构进行选型。根据投影仪的使用环境要求,对其进行有限元分析,结论表明力学性能满足指标要求。投影仪的测试结果表明此系统完全满足指标要求。

#### 关键词

动态测试,DMD (数字微反射器件),结构设计,有限元分析

## Mechanism Design and Finite Element Analysis for Infrared Scene Projector Based on Dual-DMD

Junna Li<sup>1</sup>, Jiaobo Gao<sup>1</sup>, Donglai Yang<sup>2</sup>, Yu Hu<sup>1</sup>, Jianghui Wu<sup>1</sup>, Yawei Zheng<sup>1</sup>, Liang Yuan<sup>1</sup>, Hemin Meng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab 6, Xi'an Institute of Applies Optics, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Optical Orientation and Aiming Technology Room, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 12<sup>th</sup>, 2024

#### Abstract

Infrared scene projector can simulate multiple types of targets and backgrounds, which can eval-

**文章引用:** 李俊娜, 高教波, 杨东来, 胡煜, 吴江辉, 郑雅卫, 袁良, 孟合民. 基于双 DMD 的红外场景投影仪的结构设 计及有限元分析[J]. 仪器与设备, 2024, 12(3): 354-361. DOI: 10.12677/iae.2024.123046

uate dynamic test of photoelectric detection systems. In order to improve the frame rate and the grey level of the midwave (MWIR) scene projector, the design scheme based on dual-DMD (Digital micro-mirror device) is presented. The overall structure is selected according to the characteristic of optical system and operational environment of the midwave (MWIR) scene projector. The finite element analysis of the system is carried out according to operating environment requirements, which results show that the mechanical properties meet the specification. The results of the testing for the projector illustrate that the performances of the optical systems meet the specifications of the infrared scene projector.

#### **Keywords**

Dynamic Test, Digital Micro-Mirror Device, Structural Design, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC Open Access

## 1. 引言

红外场景投影仪是红外成像制导半实物仿真试验系统的一个重要组成部分。红外成像投影仪实时生成红外图像,实现与导引头光学系统的耦合,为导引头等提供与真实作战环境等效的目标红外辐射特性, 对红外导引头的各种指标进行验证,完成红外导引头的半实物仿真。随着红外成像传感器的发展,红外 导引头、红外告警系统等光电性能进一步提高,同时对半实物仿真试验提出了更高的要求。对于以数字 微反射镜器件(DMD)作为场景生成器的红外场景投影仪而言,红外成像器件积分时间的缩短要求 DMD 在较短的时间内产生高灰度等级的红外场景[1],以提高半实物仿真测试的逼真度,由于 DMD 器件内部 微反射镜本身的偏转时间有上限[2],因此单个 DMD 无法在很短积分时间内,通过脉冲宽度调制生成高 灰度等级的动态红外场景[3],采用双 DMD 同步调制的模式可有效提高红外场景投影仪输出红外场景的 帧速和灰度[4]。

本文介绍了一种基于双 DMD 的中波红外场景投影仪,通过两个 DMD 联合工作,可以有效地提高红 外场景投影仪输出红外场景的帧速和灰度等级,从而提高半实物仿真的逼真度。文章主要介绍了系统整 体的结构框架、镜筒组件的设计及有限元分析等。

## 2. 光学系统和主要光机结构

#### 2.1. 光学系统

根据红外场景投影仪的技术指标要求,光学系统主要参数如下: 焦距为 75.07 mm,视场为 8°(圆视场),入瞳距离为 850 mm,系统总长为 447.88 mm。

红外投影光学系统(如图 1 所示),由准直投影部分、照明部分、DMD 棱镜模块和黑体组成。DMD1 用于调制图像的红外辐射强度,DMD2 用于调制图像的空间分布特征;照明系统使 DMD1 上的红外辐射 强度调制和 DMD2 上图像空间分布调制相叠加,实现对红外光束的同步调制。准直投影光学系统将经过 DMD2 调制得到的红外图像,准直投射出去,模拟来自无穷远的动态红外场景[5]。

#### 2.2. 系统整体结构设计要求及框架

根据光学系统结构特点,结合装调方法及搭载平台,整体结构设计需满足:



Figure 1. Diagram of scene projector 图 1. 投影系统组成图

- 1、镜筒 ≤Φ300 mm;
- 2、系统总重量 ≤40 KG;
- 3、满足系统功能(装调方便可靠);

4、满足3g冲击下光机组件的光轴与机械轴重合度要求小于20"。

根据光学系统结构,结合整体设计要求,中波红外场景投影仪结构由法兰、镜筒、照明显示组件和 箱体组成。根据搭载转台接口尺寸以及出瞳要求,结合光学系统结构确定该投影仪与转台配合面的位置。 准直投影系统第一片透镜口径为 \$\phi 212 (重 1.14 Kg),距离主法兰轴向距离 324 mm,工作状态下的扰动会 对光轴产生影响。因此,在左侧增加辅助法兰。准直投影部分镜筒分为两部分设计,照明显示部分采用 一体化铸造设计,箱体采用支架蒙皮的方式设计。通过整体不断优化改进设计,确定最终设计方案,场 景投影仪实物图见图 2。



Figure 2. Medium wave infrared scene projector 图 2. 中波红外场景投影仪

## 2.3. 投影镜筒组件结构设计

由光学系统可知: 准直投影部分总长 366.72 mm, 由 8 片透镜组成,前四片结构紧凑,尺寸接近,后 四片尺寸接近,仅够紧凑;前四片中最大口径 \$ 212 mm,后四片中最大口径 \$ 85 mm [5];第四片和第五片 透镜之间间距较大。根据光学结构情况结合机械加工精度要求以及装调方式,将准直投影镜筒部分分为两部分来设计(如图 3),既可以更好地保证镜筒组件的精度、方便透镜的装配和调试,还可以减轻重量[6]。

#### 2.4. 显示组件设计

双 DMD 投影系统中显示组件部分的结构较为复杂,每个 DMD 和 TIR 配合使用,两个 DMD 需要联合工作,它们与柯勒照明部分以及黑体之间的位置关系对成像质量起重要作用,将它们集成安装在转接件(此转接件为精密铸造经数控加工而成的高精度零件)上,同时每个零部件都留有足够调节余量,通过调整确保均匀性、灰度等满足系统指标要求(如图 4 所示)。



Figure 3. Diagram of barrel assembly 图 3. 镜筒组件结构图



Figure 4. The structure of lighting system 图 4. 双 DMD 照明系统结构

## 3. 镜筒组件有限元分析

#### 3.1. 有限元计算

根据技术协议:系统满足水平、垂直和径向三个方向上都应能承受 8 g 的过载,冲击下光机组件的 光轴与机械轴重合度要求小于 20",转台恢复后投影仪仍可正常工作。应用软件 ANSYS 对镜筒组件进行 有限元分析,分析的结果用以指导设计的改进和优化,系统模型有限元模型如图 5 所示。



**Figure 5.** Finite element model of projector 图 5. 镜筒组件有限元模型

所用材料为脆性材料,破环准则为抗拉破坏,这里取第一主应力作为计算结果。各工况的计算结果 如表1所示,应力云图和位移云图如图 6~图 11 所示。



Figure 6. Displacement cloud image under working condition 1 图 6. 工况一位移云图



Figure 7. Stress cloud image under working condition 1 图 7. 工况一应力云图



Figure 8. Displacement cloud image under working condition 2 图 8. 工况二位移云图



Figure 9. Stress cloud image under working condition 1 图 9. 工况二应力云图



Figure 10. Displacement cloud image under working condition 3 图 10. 工况三位移云图



Figure 11. Stress cloud image under working condition 3 图 11. 工况三应力云图

## 3.2. 计算结果分析

从镜筒组件有限元分析结果,可以得到三种工况下最大应力和最大位移(见表1)。

工况	最大应力(Mpa)	最大位移(mm)
一(水平)	0.07	0.00723
二(垂直)	0.0123	0.00253
三(径向)	0.0165	0.00744

Table 1. Maximum stress and displacement of under three working conditions 表 1. 三种工况下最大应力和最大位移

根据系统对光机组件的光轴与机械轴重合度要求小于 20",即 20/3600 = 0.00055°。

根据有限元分析结果可知最大位移偏移量为 0.00744 mm, 光轴和机械轴偏移角度为 0.00744/369.5 = 0.000121° < 0.00055°, 设计保证的位移偏移量值在最大偏转角度范围之内。

零部件所选材料为 7A04 (GB/T3191-2019),其抗拉强度为  $\sigma_b$  = 275 Mpa 。由计算可知最大应力为 X 轴施加 8 g 加速度工况下,其值 0.07 MPa 远远小于抗拉强度  $\sigma_b$  = 275 Mpa ,设计可靠满足需求。

## 4. 灰度等级测试

中波红外场景投影仪的测试系统由两台工控机(一台产生输入场景投影仪场景;另一台连接热像仪,显示热像仪接收到的图像),中波热像仪、光学平台、水平仪和三脚架(可以调节高度、俯仰、横滚)等组成[7]。将热像仪放置于出瞳位置,用水平仪将置于光学平台上的红外场景投影仪调至水平。图像生成计算机给红外投影仪输入 256 级灰度图,红外投影仪投射出灰度图像场景,热像仪接收到投射场景,与热像仪相连的图像采集计算机采集到热像仪接收到的光学场景,将图像显示到显示器上[8]。从机械设计角度出发,通过微调两个 DMD 和照明镜筒,得到如图 12 所示的系统输出灰度图。图 12 中的灰度曲线基

本呈线性分布,图像具有良好的灰度。



Figure 12. Testing result of the grey level 图 12. 灰度测试结果

## 5. 结论

为了提高系统的帧速和灰度显示等级,设计了双 DMD 同步调试模式中波红外场景投影仪。通过有限元分析,验证了系统设计,满足指标给定的冲击载荷。重量、外形尺寸及力学性能均满足设计要求,整个系统结构紧凑,调试方便。通过仿真测试验证,场景投影系统具有良好的灰度等级,满足使用要求。

## 参考文献

- [1] 张浩,张涛,崔文楠. 基于数字微反射镜器件(DMD)灰度显示帧频提高技术研究[J]. 科学与技术工程, 2014, 14(21): 257-261.
- [2] 代雨,程欣,张文明,李杰,吕升林. 基于 DMD 的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 891-897.
- [3] 苏渝阳, 王治乐, 陆敏, 邹伟. 红外目标模拟系统 DMD 成像非均匀性分析校正[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1074-1081.
- [4] 孙永雪. 基于 DMD 的红外双波段目标仿真器研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 15-20.
- [5] 郑雅卫, 胡煜, 郭云强, 高教波, 王军, 李俊娜. 基于双 DMD 的红外场景投影仪光学系统设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(10): 1330-1335.
- [6] 潘越, 徐熙平, 乔杨. 双 DMD 红外双波段场景模拟器光机结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2994-3002.
- [7] 李俊娜, 高教波, 王军, 郑雅卫, 等. 基于 DMD 的电视图像目标模拟器变焦系统结构设计[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 183-185, 190.
- [8] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.