

# 动态目标模拟离轴三反光学系统的设计

王志强<sup>1\*</sup>, 王春艳<sup>1</sup>, 孙昊<sup>1,2</sup>, 常艳贺<sup>1</sup>, 李圆圆<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 以同轴三反像差理论为基础, 运用仿真软件确定满足设计要求的初始结构参数, 基于三镜同轴, 入射光束离轴, 主镜和三镜顶点相交的光学设计理念, 设计出一种易于装调、精度保证的离轴三反光学系统。该系统结合数字微镜器件目标生成器为装甲车辆提供动态实时模拟目标。该光学系统的工作波段为 200~1200 nm, 焦距为 2800 mm, 视场为 2°, 入瞳直径为 350 mm。设计结果表明, 本光学系统最大相对畸变为 0.1056%, 各视场的波像差均优于  $\lambda/40$  (主波长  $\lambda=636.3$  nm)。在 70 lp/mm 下, 本系统的调制传递函数 (MTF) 均优于 0.54, 接近衍射极限, 成像质量好, 满足无穷远动态目标模拟需求; 对加工和装配进行公差分析后可知, 光学系统的 MTF 值大于 0.4。

**关键词** 光学设计; 动态目标模拟; 离轴三反光学系统; 公差分析

中图分类号 V556

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.012203

## Design of Off-Axis Three-Mirror Optical System for Dynamic Target Simulation

Wang Zhiqiang<sup>1\*</sup>, Wang Chunyan<sup>1</sup>, Sun Hao<sup>1,2</sup>, Chang Yanhe<sup>1</sup>, Li Yuanyuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** This study determines the initial structural parameters based on the theory of coaxial three-mirror aberrations to satisfy the design requirements using a simulation software. Through the optical design concept of coaxial three mirrors, incident beam off-axis, primary mirror, and third-mirror vertex intersecting, an off-axis three-mirror optical system, which can be easily adjusted and exhibits high accuracy, is designed and combined with a digital micromirror device target generator, thereby providing a dynamic real-time simulation target for an armored vehicle. The system has a working waveband of 200–1200 nm. Further, the effective focal length is 2800 mm, the field of view is 2°, and the diameter of entrance pupil is 350 mm. The design results prove that the maximum relative distortion of the optical system is 0.1056%. Furthermore, the wave aberration of each field of view is better than  $\lambda/40$  (the dominant wavelength  $\lambda=636.3$  nm), and the modulation transfer function (MTF) is greater than 0.54 at 70 lp/mm, which is close to the diffraction limit. The system also exhibits a good imaging quality, satisfying the requirements of an infinite dynamic target simulation. In addition, by the analysis of the machining and assembly tolerance, the MTF of the optical system greater than 0.4 can be obtained.

**Key words** optical design; dynamic target simulation; off-axial three-mirror optical system; tolerance analysis

**OCIS codes** 220.4830; 220.1250; 220.1010

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-06-20; 录用日期: 2019-06-26

基金项目: 青年基金项目(201915010008)

\* E-mail: 969204166@qq.com

## 1 引言

陆军装甲车辆上承载的光电设备相关性能的检测,会面临一个复杂、动态、时统的综合性信息空间。传统的室外实物靶标检测技术已无法满足被检测光电设备的优化设计、性能评价、测试精度和质量控制等需求,会受到人力繁多、消耗成本高、环境条件不稳定和利用不重复等诸多因素的影响。故在室内完成被测光电设备的定向精度测试这一方式逐渐受到青睐。在室内可以利用平行光管和数字微镜器件(DMD)目标生成器相结合的方式来实现动态目标模拟<sup>[1-3]</sup>,该方式能减少室外实物靶标测试的局限性和诸多不必要因素的干扰性,加强了动态模拟目标的随机性和被测光电设备捕捉目标的准确性,同时可以大幅度节约成本,有利于测试结果的复现,还可以配合其他测试方式实现多功能使用,如火控系统精度测试、模拟射击精度测试、稳定器稳定精度测试和目标自动跟踪等<sup>[4]</sup>。

本文将DMD目标生成器和平行光管组合,在室内实现被测光电设备的动态无穷远目标模拟<sup>[5]</sup>。平行光管使用的光学系统依据高斯公式和同轴三反光学系统像差理论<sup>[6-9]</sup>。本文选择初始结构类型,采用入射光偏心、倾斜和引入高次非球面的设计思想,设计出一款离轴三反光学系统。

## 2 同轴三反光学系统像差理论

目前并没有能够直接计算出离轴三反光学系统初始结构参数的方法。在系统优化过程中,将入射到同轴三反射式光学系统的光束进行适当的偏心和倾斜,达到消除同轴光学系统中心遮拦的目的,可有效校正像差,实现较大视场<sup>[10]</sup>。同轴三反光学系统的初始结构如图1所示,其中 $h_i$ 表示第 $i$ 个镜面的半口径, $l_i$ 表示第 $i$ 个镜面的物距, $l'_i$ 表示第 $i$ 个镜面的像距, $d_i$ 表示第 $i$ 镜面与第 $i+1$ 镜面的间距, $f'_1$ 表示第1镜面的焦距, $u_i$ 表示第 $i$ 镜面的物方孔径角, $u'_i$ 表示第 $i$ 镜面的像方孔径角( $i=1,2,3$ ,分别表示主、次和三镜)。

图1显示,此同轴三反光学系统由主镜(PM)M1、次镜(SM)M2、三镜(TM)M3组合而成。假定物体位于无穷远,即 $l_1=\infty, u_1=0$ ,入瞳位于主镜上,即其位置为 $x_1=0, y_1=0$ ,且主镜、次镜和三镜的圆锥系数分别为 $e_1^2, e_2^2, e_3^2$ ,后续计算中分别用 $k_1, k_2$ 和 $k_3$ 替代。各参数关系表示为

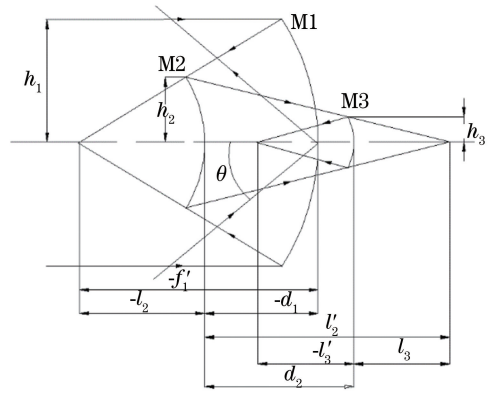


图1 同轴三反光学系统光路图

Fig. 1 Optical path of coaxial three-mirror optical system

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f'_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \\ \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} \approx \frac{u_2}{u'_2} \\ \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} \approx \frac{u_3}{u'_3} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\alpha_1$ 表示次镜对主镜的遮光比; $\alpha_2$ 表示三镜对次镜的遮光比; $\beta_1$ 表示次镜对主镜的放大率; $\beta_2$ 表示三镜对次镜的放大率。

利用高斯公式,求得光学系统初始结构的相关参数<sup>[11-12]</sup>,表达式为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2} f' \\ r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2} f' \\ r_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2} f' \\ d_1 = (1-\alpha_1)f'_1 = \frac{r_1}{2}(1-\alpha_1) = \frac{(1-\alpha_1)}{\beta_1\beta_2} f' \\ d_2 = l'_2 - l_3 = \frac{r_1}{2}\alpha_1\beta_1(1-\alpha_2) = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} f' \\ d_3 = l'_3 = \alpha_1\alpha_2 f' \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $r_1$ 表示主镜曲率半径; $r_2$ 表示次镜曲率半径; $r_3$ 表示三镜曲率半径; $d_1$ 表示主镜与次镜间距; $d_2$ 表示次镜与三镜间距; $d_3$ 表示三镜与像面间距; $f'$ 表示光学系统的焦距。

对于反射光学系统而言, $n_i$ 表示第 $i$ 镜面的物方折射率, $n'_i$ 表示第 $i$ 镜面的像方折射率,则 $n_1=n'_2=n_3=1, n'_1=n_2=n'_3=-1$ ,归一化处理之后,则 $h_1=1, f'=1, \theta=-1$ ,其中 $\theta$ 为半视场角(用弧度)。

基于赛德尔初级像差理论可得,球差  $S_I$ 、彗差  $S_{II}$ 、像散  $S_{III}$ 、场曲  $S_{IV}$ 的表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} S_I &= \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1)\beta_1^3\beta_1^3 - e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 + e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3 + \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1) - \alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2] \\ S_{II} &= \frac{e_1^2(1 - \alpha_1)\beta_1^2\beta_2^2}{4\alpha_1} + \frac{e_3^2(1 - \alpha_1)(1 + \beta_2)^3}{4\beta_1} - \frac{(1 - \alpha_1)\beta_1^2\beta_2^2}{4\alpha_1} - \frac{(1 - \alpha_2)(1 + \beta_1)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_2} - \frac{1}{2} \\ S_{III} &= \frac{e_1^2(\alpha_1 - 1)^2\beta_1\beta_2}{4\alpha_1^2} - \frac{(\alpha_1 - 1)^2\beta_1\beta_2}{4\alpha_1^2} + \frac{e_3^2(1 - \alpha_2)^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_2^2} - \frac{(1 - \alpha_2)(1 - \beta_2)^2}{\alpha_1\alpha_2\beta_2} \\ &\quad - \frac{(1 - \alpha_2)^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_2^2} - \frac{(1 - \alpha_1)\beta_1\beta_2}{\alpha_1} \\ &\quad - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \\ S_{IV} &= \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

由(3)式可知,  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, k_1, k_2, k_3$  为七个自由变量,其中  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  为四个与系统轮廓尺寸相关的自由变量,可以通过自由安排与轮廓尺寸相关的任意三个变量,得出同轴三反射式光学系统的初始结构参数  $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, d_3, k_1, k_2, k_3$ 。

### 3 离轴三反光学系统的设计

#### 3.1 设计思想

反射式光学系统相对折射式、折反射式光学系统,凭借无色差可以实现宽光谱,同时通过光路折叠使得光学系统结构紧凑,更有利于长焦距光学系统设计<sup>[13]</sup>。同轴三反光学系统存在的中心遮拦,使得光学系统能量降低,分辨率下降;Rug型离轴三反光学系统存在一次中间成像,虽然在其一次像面处设置光阑有利于消除杂散光,但是由三镜对边缘视场成像质量进行补偿比较困难,适用于小视场光学系统;Cook型离轴三反光学系统不存在中间成像,设置光阑于次镜,光学系统整体布局接近对称性分布,可以实现大视场<sup>[14]</sup>,适用于本论文。

#### 3.2 设计过程

##### 3.2.1 光学系统设计要求

光学系统设计要求如表 1 所示,其中  $F$ -

number 为本光学系统设计指标中的光圈数,MTF 为调制传递函数。

表 1 光学系统设计参数

Parameter	Specification
Wavelength /nm	200-1200
Entrance pupil diameter /mm	350
Effective focal length /mm	2800
Field of view /[(°)×(°)]	2×2
F-number	8
MTF (all field) / (70 lp·mm <sup>-1</sup> )	≥0.4

##### 3.2.2 光学系统初始结构参数计算

设定  $S_I=0$ ,且  $k_1=-1$ ,即主镜为抛物面,经过整理后得

$$0 = \alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 + k_1^2\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - \beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - k_3^2\alpha_2(1 + \beta_2)^3, \quad (4)$$

(4)式与  $\alpha_1$  并不相关,同时设定  $\beta_1\beta_2=1$ ,进一步整理之后得

$$0 = \beta_2^3[\alpha_2(1 + k_3) - (1 + k_2)] + \beta_2^2[(1 - 3k_2) - \alpha_2(1 - 3k_3)] - \beta_2[\alpha_2(1 + 3k_3^2) - (1 + 3k_2^2)] + [\alpha_2(1 - k_3^2) - (1 - k_2^2)]. \quad (5)$$

由(5)式可知,当  $\beta_2$  取值足够小,且  $\alpha_2 \approx 1$  时,能够使得  $k_2 \approx k_3$ ,即次镜与三镜的面形接近。将以上条件代入  $S_{II}=0, S_{III}=0$  的表达式中进行整理,只有当  $-\beta_1(1 - \alpha_2)=2$  时,  $k_2$  和  $k_3$  同时为 0,即次镜与三镜均为球面,便于光学系统的设计。

显然,在  $\beta_2$  足够小时,只有  $\beta_1$  足够大才能够使光学系统结构较为合理。本文选取  $\beta_1 = -1000, \beta_2 = -0.001, \alpha_2 = 0.9987$ ,设定与轮廓尺寸相关的另一个变量  $\alpha_1$  为自由值,通过 MATLAB 软件进行编程求解,得出多例同轴三反射式光学系统的初始结构参数,具体如表 2 所示。

##### 3.2.3 光学系统的结构参数计算及优化

本文选择  $\alpha_1 = 0.3333, d_1 + d_2 \approx 0$ ,即主镜与三镜的顶点重合,并且将次镜设置为孔径光阑,次镜和三镜均为球面(conic 为非球面系数),这样设计明显降低同轴三反光学系统初始结构的复杂程度,具体初始结构参数如表 3 所示。利用 ZEMAX 软件对同轴三反光学系统进行多次优化之后的结构参数如表 4 所示。

同轴三反光学系统点列图如图 2(a)所示,各视场点列图半径的方均根值(RMS)均大于艾里斑半径。MTF 曲线如图 2(b)所示,工作波段范围内的 MTF 曲线并没有接近衍射极限,表明像质并不良好。

本系统采用偏心和倾斜的入射光线来达到离轴效果。随着入射光束的偏心 and 倾斜,光学系统

表2 初始结构参数计算列表

Table 2 Computation list of initial structural parameters

$\alpha_1$	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$r_3/\text{mm}$	$d_1/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$d_3/\text{mm}$	$d_1+d_2/\text{mm}$
0.3000	-2800	-1681.6817	-1678.3183	-1960	1680	-838.3200	-280
0.3200	-2800	-1793.7938	-1790.2062	-1904	1792	-894.2080	-112
0.3300	-2800	-1849.8498	-1846.1502	-1876	1848	-922.1520	-28
0.3330	-2800	-1966.6667	-1862.9333	-1867.60	1864.80	-930.5352	-2.8000
0.3333	-2800	-1868.3483	-1864.6117	-1866.76	1866.68	-931.3735	-0.0080
0.3336	-2800	-1870.0300	-1866.2900	-1865.92	1868.16	-932.2118	2.2400
0.3338	-2800	-1871.1512	-1867.4088	-1865.36	1869.28	-932.7707	3.9200
0.3340	-2800	-1872.2723	-1868.5277	-1864.80	1870.40	-933.3296	5.6000
0.3350	-2800	-1877.8779	-1874.4088	-1862	1876	-936.1240	14
0.3360	-2800	-1883.4835	-1879.7165	-1859.20	1881.60	-938.9184	22.4000

表3 同轴三反系统的初始参数

Table 3 Initial parameters of coaxial three-mirror system

Type	Radius /mm	Distance /mm	Conic
PM	-5600	-1866.7600	-1
SM	-1868.3483	1866.7600	0
TM	-1864.6117	-831.3735	0

表4 优化后的同轴三反光学系统结构参数

Table 4 Parameters of optimized coaxial three-mirror optical system

Type	Radius /mm	Distance /mm	Conic
PM	-4299.6328	-1558.2610	-1
SM	-1174.5877	1558.2615	0
TM	-1555.6747	-785.4488	0

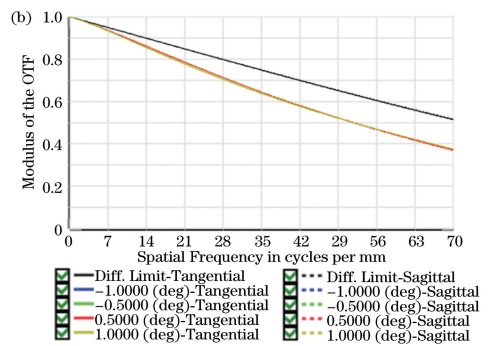
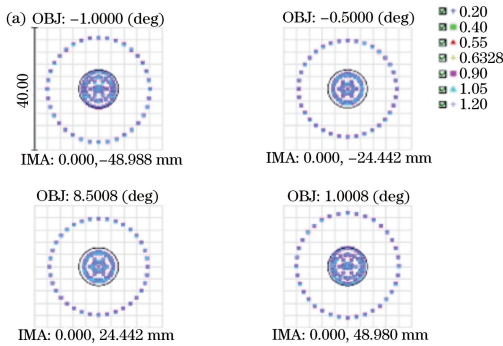


图2 优化后的同轴三反光学系统像质评价。(a)系统点列图;(b)系统MTF曲线图

Fig. 2 Imaging quality evaluation of optimized coaxial three-mirror optical system. (a) Spot diagram of system; (b) MTF curves of system

失去旋转对称性,使得光学系统的像差增大<sup>[10]</sup>,边缘视场的成像质量变差。考虑到本光学系统的凸面形次镜是实际加工中的一个难点,则将其保持为球面,主镜和三镜面形设定为二次非球面系数 $k_1$ 和 $k_3$ 均为0的偶次非球面面形,通过高次项相互间的平衡大幅度提高系统像质,加大系统的加工和装调公差范围,同时主镜和三镜的二次非球面系数为0也降低了非球面镜的加工和装调难度,这更有利于

设计指标要求的实现<sup>[10,15]</sup>。

通过不断更改优化条件,建立适当的优化函数,利用ZEMAX软件对函数进行多次优化,得到满足设计指标、像质良好的离轴三反光学系统。离轴三反光学系统对应的结构参数如表5所示( $A_4$ 为四次项系数, $A_6$ 为六次项系数),其光路图及性能曲线图如图3所示,其中PSF为点扩散函数,( $X,Y$ )是点扩散函数对应的几何坐标。

表5 共轴高次非球面的离轴三反光学系统结构参数

Table 5 Parameters of coaxial high-order aspherical surface based off-axis three-mirror optical system

Type	Surface type	Radius /mm	Distance /mm	$A_4$	$A_6$
PM	Even aspheric surface	-5999.930	-1597.506	$1.016 \times 10^{-12}$	$-2.379 \times 10^{-20}$
SM	Spherical surface	-1914.321	1597.506	0	0
TM	Even aspheric surface	-2791.271	-2000	$-1.103 \times 10^{-12}$	$-3.654 \times 10^{-19}$

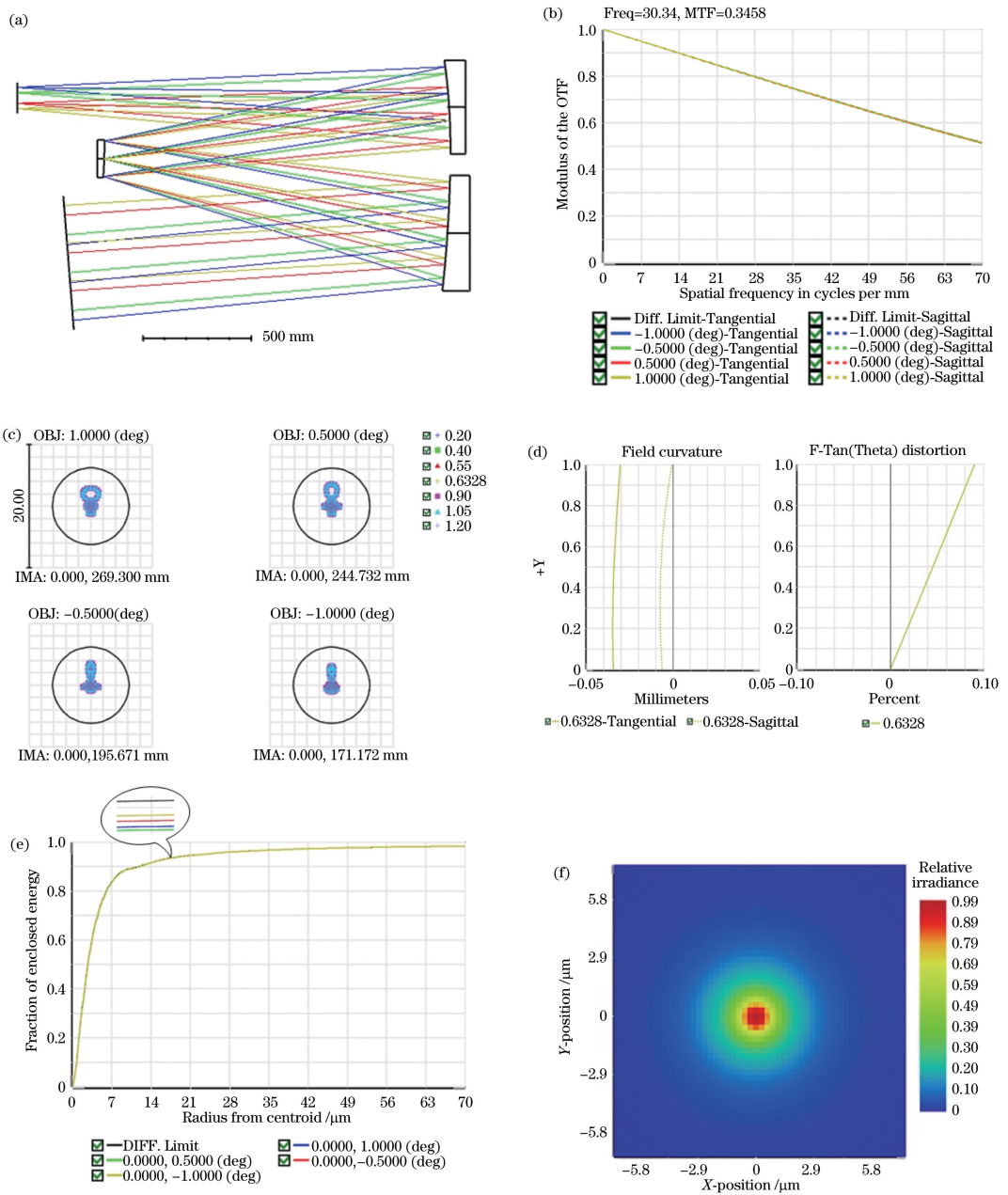


图3 离轴三反光学系统光路及性能曲线图。(a)系统光路图;(b)系统MTF光路图;(c)系统点列图;(d)系统场曲与畸变;(e)圈入能量分数;(f)复色光PSF

Fig. 3 Optical path and performance charts of off-axis three-mirror optical system. (a) Optical path of system; (b) MTF curves of system; (c) spot diagrams of system; (d) field curvature and distortion of system; (e) fraction of enclosed energy; (f) polychromatic PSF

### 4 离轴三反光学系统像质评价

像质评价是光学系统设计的关键环节之一,像质的优劣直接影响光学系统设计的成败,本光学系统的综合设计结果如下。

1)光学系统的点列图显示,本光学系统在各视场中最大弥散斑半径为  $3.604 \mu\text{m}$ ,远小于系统的艾里斑半径  $6.636 \mu\text{m}$ 。

2)光学系统的 MTF 曲线图显示,本光学系统在紫外到近红外波段内,各视场在  $70\text{lp/mm}$  处的 MTF 均优于  $0.54$ ,接近衍射极限,呈现良好的成像质量。

3)光学系统的畸变图显示,本光学系统的最大畸变为  $0.1056\%$ ,对于大视场、长焦距的光学系统来说,畸变已经得到良好的校正。

4)光学系统衍射能量分布图显示,  $83.5\%$  的能

量存在于辐射半径  $7 \mu\text{m}$  范围内,和 PSF 共同反映出本光学系统能量集中这一特性。

5)光学系统中心波长的各视场( $x, y$ )的波像差统计表如表 6 所示,系统的最大波像差 RMS 为  $0.0092\lambda$ ,小于  $\lambda/90$ 。

表 6 不同视场对应的波像差(主波长  $\lambda=636.3 \text{ nm}$ )

Table 6 Wave aberrations of different field of view (primary wavelength  $\lambda=636.3 \text{ nm}$ )

$x /(^{\circ})$	$y /(^{\circ})$	RMS $/\lambda$
0	1	0.0064
0	0.5	0.0092
0	-0.5	0.0089
0	-1	0.0078

## 5 离轴三反光学系统公差分析

光学系统设计完成之后,公差分析是对其实用性评价的重要因素。离轴三反光学系统的误差主要来源于 3 个方面。1)加工误差,包括反射镜顶点曲率半径、非球面系数、离轴量等,可调节各镜面间的间隔对其进行补偿。2)面形不规则误差,属于局部面形误差,由各镜面面形不规则误差引起的光学系统的波前像差,用 RMS 表示。离轴三反光学系统的各镜面面积比较大,较小面积的缺陷对系统的成像质量不会有影响,所以不对系统中面形精度的峰谷值作太高的限制。3)装配误差,包括镜面在装配过程中相对于光轴的倾斜和偏心。在实际的装配过程中可以通过干涉仪的检测结果,配合 ZEMAX 软件模拟,确定装调过程中应有的调节矢量。

本光学系统在公差分配中遵循公差分配原则,即在满足光学系统设计指标要求的前提下,收紧对传递函数较为敏感的公差因素,放松对传递函数不敏感的公差因素,使光学系统最大程度上放松对加工和装调公差的要求,达到既减少加工成本,又降低装调难度的作用。采用 Monte-Carlo 分析方法对本光学系统进行公差分析,计算分析 1000 个样本之后,得到光学系统合理的公差项分配结果,包括装配公差: $X, Y$  方向的偏心量( $D_X, D_Y$ )及绕  $X, Y$  方向的倾角( $T_X, T_Y$ );加工公差:厚度变化量( $\Delta D$ ),半径变化量( $\Delta R$ ),圆锥系数变化量( $\Delta K$ ),具体情况如表 7 所示,得到的公差分析结果如表 8 所示。在实现公差分配的条件下,在  $70 \text{ lp/mm}$  下,90%以上的光学系统分析样本的 MTF 值大于 0.474,最低 MTF 值为 0.469,100%的光学系统分析样本的 MTF 值大于 0.4,满足系统的设计指标要求。

表 7 光学系统公差分配结果

Table 7 Tolerance allocation results of optical systems

Tolerance	Item	PM	SM	TM
Assembling	$D_X/\text{mm}$	$\pm 0.07$		$\pm 0.3$
	$D_Y/\text{mm}$	$\pm 0.1$		$\pm 0.1$
	$T_X/(')$	$\pm 1.2$		$\pm 1.8$
	$T_Y/(')$	$\pm 15$		$\pm 18$
Manufacturing	$\Delta D/\text{mm}$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$
	$\Delta R$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$	$\pm 0.2$
	$\Delta K$	$\pm 0.002$		$\pm 0.002$

表 8 光学系统的公差分析结果

Table 8 Tolerance analysis results of optical systems

MTF	Percentage /%
$>0.400$	100
$>0.474$	90
$>0.486$	80
$>0.519$	50
$>0.537$	20
$>0.542$	10

## 6 结 论

离轴三反光学系统不产生色差、其像质不受光学材料折射率、均匀性、条纹度等影响,并且具有大口径、长焦距、体积紧凑和轻量化等特点而备受动态目标模拟领域的青睐。基于 DMD 目标生成器的静、动态目标信息,通过本光学系统为被检测光电设备提供实时模拟目标,可实现大视场、大口径、长焦距的无穷远目标模拟。该设计思想可进一步推广到动态、高精度星模拟器的研制中。

本文对光学系统的初始结构选择、结构优化设计和公差分析等方面进行了详细论述,该设计结果可为相关领域工作者提供参考。该设计思想可进一步拓展为:运用小视场离轴三反光学系统搭配高帧频的 DMD 目标生成器,测试被测光电设备的动态响应能力;运用大视场离轴三反光学系统搭配低帧频的 DMD 目标生成器,测试被测光电设备的大范围搜索能力。对动态目标模拟技术进行更深入研究,将对不同被检测光电设备的研制起指导作用。

## 参 考 文 献

- [1] Chen L, Qu H M, Gu G H, et al. Small target track simulation system designed for dynamic infrared scene simulation [J]. Laser & Infrared, 2011, 41 (10): 1144-1149.

陈亮, 屈惠明, 顾国华, 等. 红外动态场景中目标轨迹模拟系统的设计 [J]. 激光与红外, 2011, 41

- (10): 1144-1149.
- [2] Gao Z D, Zhu Y Y, Gao J B, et al. Simulation technology of dynamic infrared triangle target with decoy[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(2): 341-348.  
高泽东, 朱院院, 高教波, 等. 动态红外三角形目标及干扰模拟技术研究[J]. 应用光学, 2013, 34(2): 341-348.
- [3] Li B, Wang W N, Tang J. Study on simulation space aim of novel optical dynamic target[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(3): 201-205.  
李博, 王伟娜, 唐杰. 新型光学动态靶标模拟空间目标研究[J]. 工程设计学报, 2008, 15(3): 201-205.
- [4] Hao Q, Nan L J, Liu B, et al. Compensation method of aiming line translation of tank fire control system[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2018, 39(3): 71-75.  
郝强, 南立军, 刘斌, 等. 坦克火控系统瞄准线平移的补偿方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(3): 71-75.
- [5] Ma J, He X, Han B. Novel dynamic optical multitarget simulation system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 374-379.  
马军, 何煦, 韩冰. 新型动态多光学目标模拟装置研究[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 374-379.
- [6] Meng Q Y, Dong J H, Qu H F, et al. Light optical system design with wide spectral band, large field of view for deep space exploration[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0122001.  
孟庆宇, 董吉洪, 曲洪丰, 等. 用于深空探测的宽波段大视场小型光学系统设计[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0122001.
- [7] Chen Z, Zhang X X, Chen C Z, et al. A common aperture coaxial three-mirror optical system with high resolution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1116002.  
陈哲, 张星祥, 陈长征, 等. 高分辨率共孔径同轴三反光学系统[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1116002.
- [8] Liu J, Liu W Q, Kang Y S, et al. Optical design of off-axis four-mirror optical system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1022002.  
刘军, 刘伟奇, 康玉思, 等. 大视场离轴四反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1022002.
- [9] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [10] Zhao W C. Design of improved off-axis TMA optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2837-2843.  
赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2837-2843.
- [11] Yu X, Zhang B, Hong Y F. A method for initial configuration of off-axis three-mirror system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 112201.  
于鑫, 张葆, 洪永丰. 一种离轴三反射系统初始结构的求解方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 112201.
- [12] Liu J, Huang W, Xu W C, et al. Optical design of the off-axis three-mirror reflective telecentric system with wide field of view[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 122203.  
刘军, 黄玮, 许伟才, 等. 大视场像方远心离轴三反射镜光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 122203.
- [13] Zhang K K, Ruan N J, Fu D Y. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2008, 29(3): 63-70.  
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(3): 63-70.
- [14] Ming M, Yang F, Zhao J Y, et al. Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 149-154.  
明名, 杨飞, 赵金宇, 等. 折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 149-154.
- [15] Zhang F. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2557-2563.  
张峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.