

离轴三反射式光学系统的设计

Design of Off-Axis Three-Mirror Optical System

刘 辉 李兴隆 裴云天 潘 鸣

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

Liu Hui Li Xinglong Pei Yuntian Pan Ming

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

摘 要 详细讨论了三反射式光学系统的设计方法, 从初级像差理论出发推导出了三反射式系统初始结构的计算公式, 并且得出了系统结构形式与其基本结构参数和焦距之间的关系。通过设计实例讨论了不同的三反射式光学系统的特点及其应用。设计了大视场、小 F 数且实现衍射极限成像的 Cook-TMA 光学系统和有利于杂散光抑制、小 F 数且实现衍射极限成像的 Rug-TMA 光学系统。

关 键 词 光学设计; 同轴三反射; 离轴三反射; Cook-TMA; Rug-TMA

Abstract The design of three-mirror system is discussed in detail and the formulation for calculating the initial structure of three-mirror system is derived based on the primary aberration theory, and the relationship between the system structure and its basic structure parameters, focal length is deduced. The characteristics and applications of different three-mirror systems were discussed based on design examples. Two typical three-mirror optical systems are designed. One is Cook-TMA optical system with a wide field of view, small F number, and the diffraction limit imaging, and the other is Rug-TMA optical system which is propitious to suppress the stray light with small F number and achieves the diffraction limit imaging.

Key words optical design; on-axis three-mirror system; off-axis three-mirror system; Cook-TMA; Rug-TMA

中图分类号 O435.2 doi 10.3788/LOP20084512.0059

1 引言

进入 20 世纪 90 年代后, 在空间对地遥感领域中, 光学系统的要求是: 地面分辨力高, 地面覆盖宽。研制相机系统的首要任务是在满足上述条件下, 使相机体积减小, 重量减轻。鉴于系统角分辨率 $\sigma' = (1.22\lambda)/D$, λ 为波长, D 为系统入瞳直径, 增大口径对于提高空间光学系统的性能有利, 但在研制长焦距或超长焦距光学系统时, 较少采用大口径折射和折反系统。原因在于: 大口径的折射系统和折反系统需采用特殊光学材料或复杂的结构来消二级光谱; 其次大尺寸、高光学均匀性的材料较难熔炼, 对加工与装调要求极高; 而且大口径材料对环境温度和压力的变化也特别敏感, 其使用范围受到了限制。

与之相比, 反射系统则具有如下特点: 不存在色差, 二级光谱也就不存在, 因此可以用于很宽的谱段成像; 零件数相对较少, 光学系统孔径可以做得较大, 且容易实现轻量化设计; 减小相机体积, 使整个光学系统的重量减轻; 反射式光学系统对材料要求相对较低, 取材容易; 设计型式非常灵活, 可以借助折转反射镜来折叠光路, 使结构紧凑; 可以用非球面来获得大口径、大视场、长焦距等多种性能要求的系统。一般两反射式光学系统的优化变量比较少(一个间距、两个半径和两个非球面系数共五个), 很难满足大视场、大相对孔径的要求。三反射镜系统由三片反射镜组成, 有两个间距、三个半径和三个圆锥系数共八个变量, 除了满足系统焦距、球差、彗差、像散、场曲等系统性

能和像质要求外,还有足够的变量进行系统布局和结构的优化设计。三反射镜系统比两反射镜系统的视场大,且易于控制光学系统的杂散辐射,增加了轴外视场的光通量,使得像面照度更加均匀^[1]。

随着空间技术的发展,全反射式光学系统,尤其是三反射式光学系统正在逐渐成为空间光学系统的主要形式^[1-4]。

国内三反射光学系统的研究尚处于起步阶段,很多设计缺乏系统的理论指导,而且所设计的系统 F 数均较大(均在10左右,很少设计 F 数小于3的离轴三反射光学系统)^[2-4],很难适应国内探测器的发展现状(国内探测器尤其是红外焦平面探测器的技术相对落后,探测器的比探测率比较低,为了实现探测所需的信噪比,要求光学系统具有小的 F 数),因而大多不能用于实用的空间相机中。本文详细讨论离轴三反射式光学系统的设计方法,并通过此算法设计出大视场、小 F 数的适用于空间目标捕获和跟踪的两种离轴三反射式光学系统。

2 初始结构计算

离轴三反射式光学系统是在同轴三反射式光学系统的基础上,将光学系统的光阑离轴、视场离轴或镜面倾斜,得到的非对称光学系统以消除同轴光学系统存在的中心遮拦问题。所以离轴三反射式光学系统的设计是以同轴三反射式光学系统的设计公式为基础的。一般是先在同轴情况下,利用几何光学知识和像差理论来计算三面反射镜各自的半径、间距(厚度)和圆锥系数等八个基本参数,然后对此同轴系统采用光阑离轴或视场离轴,以消除中心遮拦。所以离轴三反射式光学系统设计的理论基础就是同轴三反射式光学系统的三级像差理论。

同轴三反射式光学系统的光路结构和参数定义如图1所示。图中的长度值均为有符号的数据,其符

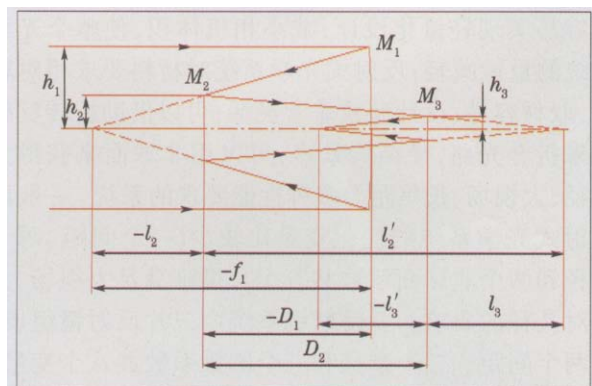


图1 同轴三反射式光学系统的光路示意图

号定义为自左向右为正,反之则为负。

对于同轴三反射式光学系统,其结构参数包括:各反射面的半径 R_1, R_2, R_3 ;镜间间距 $D_1, D_2, D_3=l'_3$;各反射面的二次非球面系数(圆锥系数) $k_1=-e_1^2, k_2=-e_2^2, k_3=-e_3^2$ (这里 e_1, e_2, e_3 分别为各反射面的偏心率);次镜对主镜的遮拦比 α_1 ;三镜对次镜的遮拦比 α_2 ;次镜的放大率 β_1 ;三镜的放大率 β_2 。它们之间满足关系式

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

又根据高斯成像公式得

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{R} \xrightarrow{\text{对于反射镜 } n' = -n} \frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{R}, \quad (2)$$

经过推导可以得出

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f'; R_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2} f'; R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f', \quad (3)$$

$$\begin{cases} D_1 = (1-\alpha_1)f'_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2} f' & D_2 = l'_2 - l_3 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} f'; \\ D_3 = l'_3 = \alpha_1 \alpha_2 f' = R_1 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 / 2. \end{cases} \quad (4)$$

可见同轴三反射式光学系统的结构形式由其结构参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 和焦距 f' 完全决定,且它们与系统结构形式的关系如表1所示。

表1 同轴三反射式光学系统结构参数与其结构形式的对应关系表

结构形式	α_1	α_2	β_1	β_2	f'
无中间像	(0, 1)	(1, ∞)	(0, ∞)	(0, ∞)	(- ∞ , 0)
	(0, 1)	(0, 1)	($-\infty$, 0)	($-\infty$, 0)	
次三镜之间有中间像	(0, 1)	($-\infty$, 0)	($-\infty$, 0)	(0, ∞)	(0, ∞)
主次镜之间有中间像	(-1, 0)	(1, ∞)	($-\infty$, 0)	(0, ∞)	(0, ∞)
	(-1, 0)	(0, 1)	(0, ∞)	($-\infty$, 0)	
成两次中间像	(-1, 0)	($-\infty$, 0)	(0, ∞)	(0, ∞)	($-\infty$, 0)

由初级像差理论得,以 h 表示镜面半口径, y 表示主光线在镜面上的投射高度, J 表示拉赫不变量 $J = nuy = n'u'y'$,则初级像差系数分别为^[5]

$$\begin{cases} S_I = \sum hP + \sum h^4 K; S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 y K; \\ S_{III} = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \phi + \sum h^2 y^2 K; S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h} \\ S_V = \sum \frac{y^3}{h^3} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} (3\phi + \frac{\Pi}{h}) - \\ J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta(\frac{1}{n^2}) + \sum h y^3 K. \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$W = \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \Delta \frac{u}{n}; P = \left[\frac{\Delta u}{\Delta(1/n)} \right]^2 \Delta \frac{u}{n} = W \frac{\Delta u}{\Delta(1/n)};$$

$$\Pi = \frac{\Delta(nu)}{nn'}; \phi = \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n}; K = -\frac{e^2}{R^3} \Delta n = \frac{k}{R^3} \Delta n. \quad (6)$$

主光线在各镜面上的投射高度 y 跟孔径光阑的位置有关:

① 孔径光阑在主镜上

$$y_1 = 0; \quad y_2 = -\frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2} f' w = \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2};$$

$$y_3 = -\frac{\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2} f' w = \frac{\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2} \quad (7)$$

② 孔径光阑在次镜上

$$y_1 = -\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_1 \beta_1 \beta_2} f' w = \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 \beta_1 \beta_2};$$

$$y_2 = 0;$$

$$y_3 = -\frac{1 - \alpha_2}{\beta_2} f' w = \frac{1 - \alpha_2}{\beta_2}. \quad (8)$$

对于反射系统 $n_1 = n_2' = n_3 = 1$, $n_1' = n_2 = n_3' = -1$, 物体位于无穷远时 $u_1 = 0$ 。令 $h_1 = 1$, $f' = 1$, 半视场角 $w = -1$, 则对三反射式光学系统利用近轴光学成像公式和初级像差系数的计算公式, 并做如下变量代换得

$$a_1 = -\frac{2h_1^4}{R_1^3}, b_1 = \frac{2h_2^4}{R_2^3}, c_1 = -\frac{2h_3^4}{R_3^3}, d_1 = \sum hP;$$

$$a_2 = -\frac{2h_1^3 y_1}{R_1^3}, b_2 = \frac{2h_2^3 y_2}{R_2^3}, c_2 = -\frac{2h_3^3 y_3}{R_3^3}, d_2 = \sum yP - J \sum W;$$

$$a_3 = -\frac{2h_1^2 y_1^2}{R_1^3}, b_3 = \frac{2h_2^2 y_2^2}{R_2^3}, c_3 = -\frac{2h_3^2 y_3^2}{R_3^3}, d_3 = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \phi \quad (9)$$

$$S_I = 0, S_{II} = 0, S_{III} = 0 \Rightarrow \begin{cases} a_1 k_1 + b_1 k_2 + c_1 k_3 + d_1 = 0 \\ a_2 k_1 + b_2 k_2 + c_2 k_3 + d_2 = 0 \\ a_3 k_1 + b_3 k_2 + c_3 k_3 + d_3 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{IV} = 0 \Rightarrow \beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} = 0. \quad (11)$$

解三元线性方程组(10)得

$$\begin{cases} k_1 = -\frac{b_1 k_2 + c_1 k_3 + d_1}{a_1} \\ k_2 = \frac{(a_1 c_2 - a_2 c_1) k_3 + a_1 d_2 - a_2 d_1}{a_2 b_1 - a_1 b_2} \\ k_3 = \frac{(a_1 b_2 - a_2 b_1) \cdot (a_1 d_3 - a_3 d_1) - (a_1 d_2 - a_2 d_1) \cdot (a_1 b_3 - a_3 b_1)}{(a_1 c_2 - a_2 c_1) \cdot (a_1 b_3 - a_3 b_1) - (a_1 c_3 - a_2 c_3) \cdot (a_1 b_2 - a_2 b_1)} \end{cases} \quad (12)$$

同轴三反射式光学系统的设计步骤:

1) 根据系统的结构形式要求, 表 1 确定参数 α_1 , α_2 , β_1 , β_2 的取值范围;

2) 利用四个结构参数 α_1 , α_2 , β_1 , β_2 和系统焦距 f' , 通过公式(3)和(4)求解各反射面的半径 R_1 , R_2 , R_3 和镜间间距 D_1 , D_2 , D_3 。

3) 利用公式(12)求解各反射面的二次非球面系数 k_1 , k_2 , k_3 。

在同轴系统优化设计初步完成后, 可以对该系统进行光阑离轴或视场离轴, 直至完全消除中心遮拦, 进一步做优化设计, 到系统像质满足设计要求为止。这样, 一个基于同轴三反射式光学系统的离轴三反射式光学系统的方案设计工作就基本完成了。

3 设计实例

1) 无中间像的三反射式光学系统(Cook-TMA): 其初始结构参数为 $\alpha_1 = 0.4$, $\alpha_2 = 2$, $\beta_1 = 1.5$, $\beta_2 = 0.4$, $f' = -375$ mm, $D = 150$ mm, 系统 $F/\# = 2.5$, 工作波段: 中波

表 2 Cook-TMA 光学系统的参数

系统	初始计算参数(同轴)			离轴优化结果		
	主镜	次镜	三镜	主镜	次镜	三镜
曲率半径/mm	-1250	300.03	-428.63	-1733.93	-425.58	-544.58
厚度/mm	-375	375	-300.045	-381.41	400.47	-430.47
圆锥常数	-0.588	1.96	0.14	-1.24	2.19	0.19
光阑离轴/mm	-			-110		
视场离轴(°)	-			-7		
视场角(°)	2.4×2.4			±5		

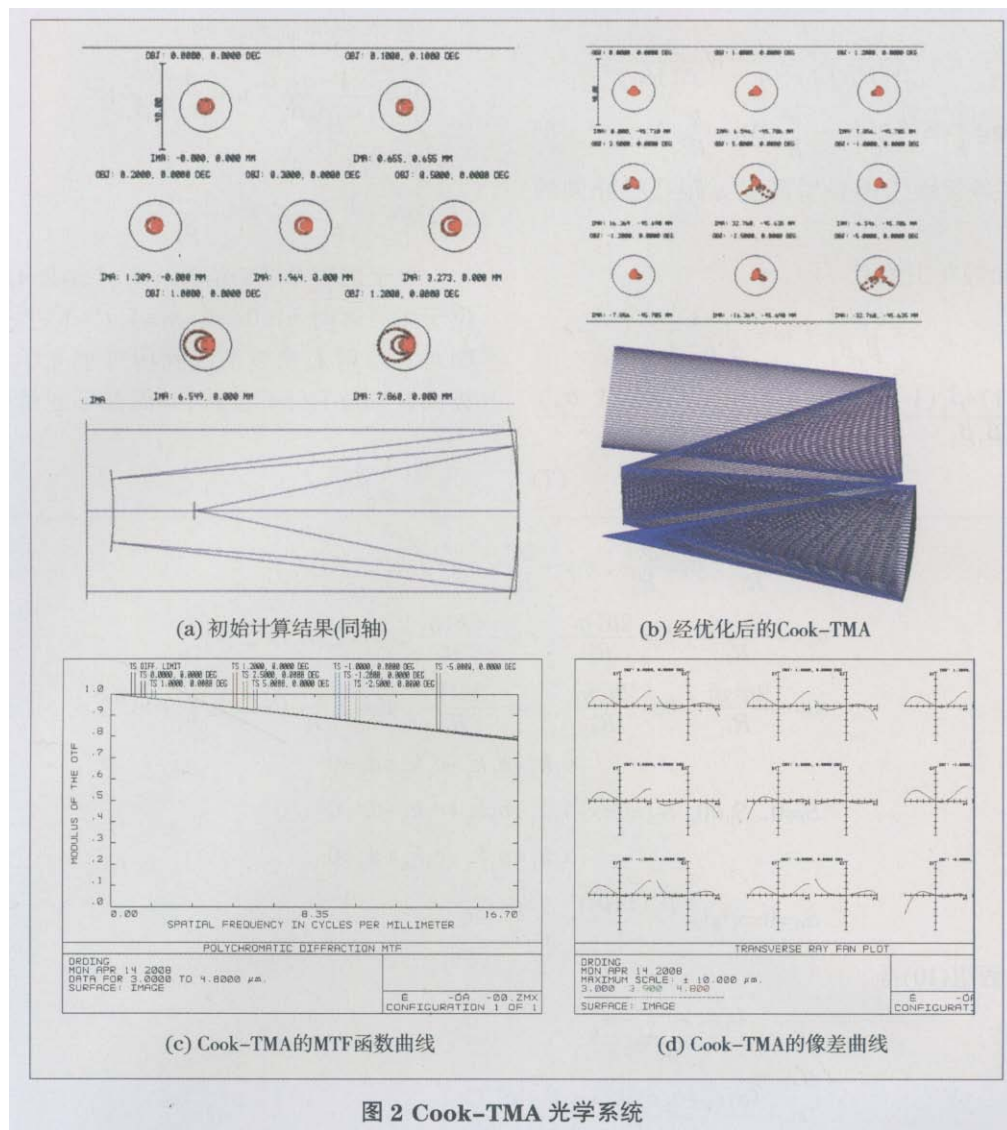


图2 Cook-TMA 光学系统

红外波段(3.0~4.8 μm),如表2和图2所示。

2) 有中间像的三反射式光学系统 (Rug-TMA): 其初始结构参数为 $\alpha_1=0.4$, $\alpha_2=-2$, $\beta_1=-1.5$, $\beta_2=0.4$, $f'=375$ mm, $D=150$ mm, 系统 $F/\# = 2.5$, 工作波段: 中波红外波段(3.0~4.8 μm),如表3和图3所示。

表3 Rug-TMA 光学系统的参数

系统	初始计算参数(同轴)			离轴优化结果		
	主镜	次镜	三镜	主镜	次镜	三镜
曲率半径/mm	-1250	-1499.25	-428.63	-568.71	-256.48	-497.65
厚度/mm	-375	1125	300.075	-250.76	550	-492.44
圆锥常数	5.40	225	-0.45	-0.47	-0.99	-2.47
光阑离轴/mm		-			-200	
视场离轴/(°)		-			7.06	
视场角/(°)		1			2×2	

4 结论

利用初级像差理论详细推导出三反射式光学系统结构参数的计算公式。通过确定同轴情况下三反射式光学系统结构参数与其结构形式的对应关系,为三反射式光学系统设计初始结构参数计算四个基本结构参数的选取提供了依据。

在理论推导的基础上,利用VC语言编程实现了三反射式光学系统初始结构计算的算法,通过视场离轴和光阑离轴相结合的方式设计了两个大视场、小 F 数且在中波红外通道实现衍射极限成像的离轴三反射式光学系统: Cook-TMA和Rug-TMA。其中Cook-TMA无中间像,但是光学视场很大(线视场),适用于大视场目标捕获的扫描成像光学系统;Rug-TMA成一次中间像,而且出瞳可用(理论上可以实现100%的冷光阑效率),能够有效抑制杂散光,适用于小

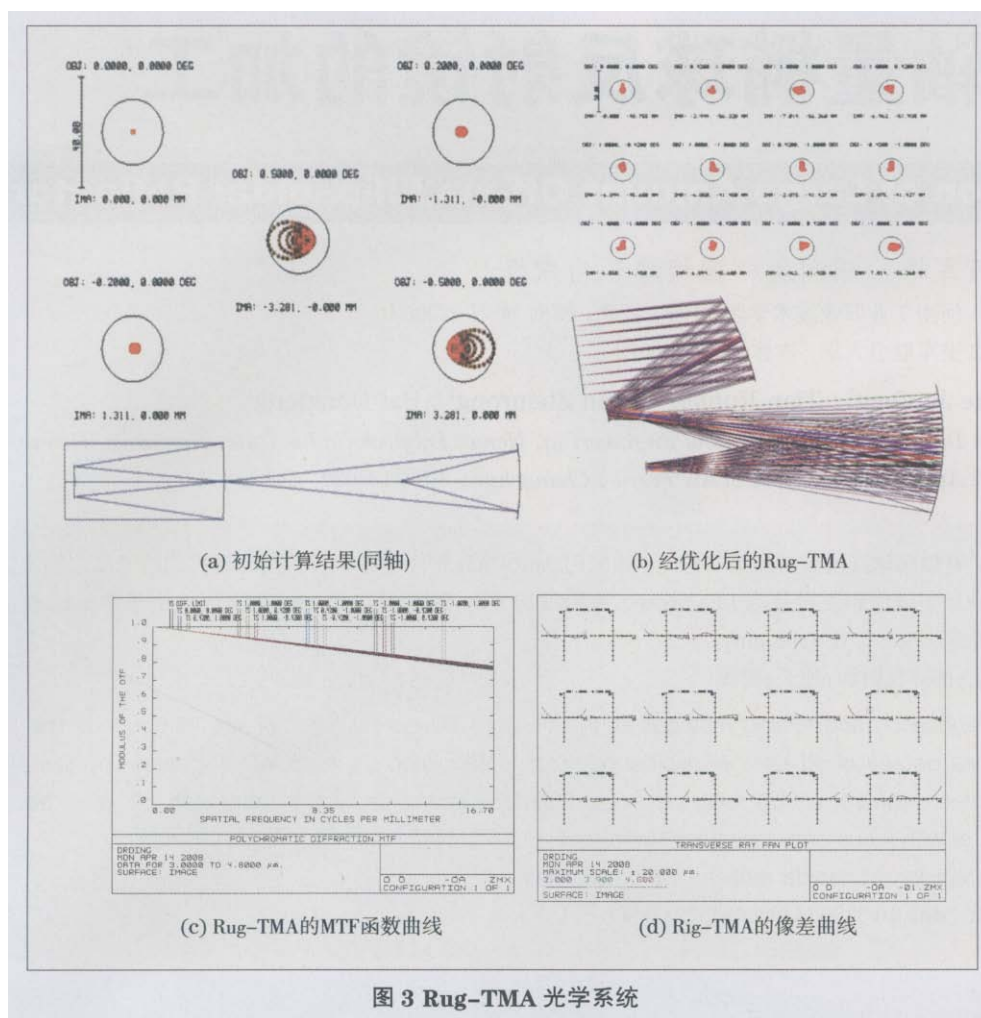


图3 Rug-TMA 光学系统

视场(面视场)、大范围目标跟踪的光学系统。

收稿日期:2008-05-16;收到修改稿日期:2008-07-07

作者简介:刘辉(1982-),男,四川人,博士研究生,研究方向为光机系统设计。

E-mail: xchengxiang_lh@qq.com。

导师简介:裴云天(1946-),男,浙江人,研究员、博士生导师,研究方向为空间遥感、应用光学。

E-mail: peiyuntian@online.sh.cn

参考文献

- 1 卜江萍,田维坚,杨小君等.一种新型离轴三反式光学系统的设计[J].光子学报,2006,35(4):608~610
- 2 常军,翁志成,姜会林等.用于空间的三反射镜光学系统设计[J].光学学报,2003,23(2):216~219
- 3 张亮,安源,金光.大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统设计[J].红外与激光工程,2007,36(2):278~280
- 4 常军,翁志成,丛小杰.长焦距、大视场、离轴望远系统的光学设计[J].光电子·激光,2003,14(7):687~689
- 5 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].北京:科学出版社出版,1994,157~161