

## 长焦距宽视场离轴三反光管设计

杨宇飞<sup>1,2</sup>, 颜昌翔<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对大口径、长焦距、宽视场平行光管高像质的应用需求, 提出一种采用离轴三反射镜结构的平行光管。从共轴三反理论出发, 推导出系统的初始结构; 并且在用 zemax 软件优化时, 提出一种基于 ZPL 语言优化离轴量的方法。设计出一个焦距 10 m, 视场  $2^\circ \times 1^\circ$  的离轴三反平行光管。设计结果表明, 系统像质接近衍射极限, 全视场波像差 RMS 值优于  $\lambda/200$  ( $\lambda=632.8$  nm), 系统总长度小于  $f'/3$ , 为大口径、长焦距、宽视场光管设计提供了一种设计方法。

**关键词:** 平行光管; 离轴三反; 长焦距; 宽视场; ZPL

**中图分类号:** O43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2070-05

## Optical design of the off-axis three-mirror anastigmatic collimator with long focal length and wide field

Yang Yufei<sup>1,2</sup>, Yan Changxiang<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the application demand of high image quality collimator with large diameter, long focal length and wide field, an off-axis three-mirror configuration for the light collimator was proposed. Based on the coaxial three-mirror configuration theories, the computation of the initial structure of the system was derived, and a method of optimizing the off-axis amount was put forward by using the ZPL language of zemax software. A wide field off-axis three-mirror light tubes was designed, with focal length of 10 m,  $F$ -number of 28.57. Results show that the modulation transfer function of this system is near the diffraction limit, within the field  $2^\circ \times 1^\circ$ , the full field wave-front aberration is less than  $\lambda/200$  ( $\lambda=632.8$  nm), the total length of the system is less than  $f'/3$ , providing a possibility design of long focal length, large diameter, and wide field of view light collimator.

**Key words:** collimator; off-axis TMA; long focal length; wide field; ZPL

收稿日期: 2014-11-03; 修订日期: 2014-12-07

基金项目: 国家 863 高新技术发展计划(2011AA12A103); 中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 杨宇飞(1991-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: yyf2008223@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。Email: yancx@ciomp.ac.cn

## 0 引言

平行光管又称准直仪,是各类光学仪器装调常用的标定设备。它的主要作用是提供一个无限远的目标并给出一束标准出射光<sup>[1]</sup>。主要光学结构由物镜及置于物镜焦平面上的分划板等附件组成。根据主镜结构分为透射式与反射式两种。透射式光管受透镜材料的限制,一般用来检测可见光光学系统,而且它的口径不能做到很大;反射式光管不受光学材料折射率、均匀性、条纹度的影响,没有色差,结构简单<sup>[2]</sup>,而且主口径和焦距都可以做很大,因此得到越来越广泛的应用。同轴两镜反射系统常采用卡塞格林系统,但是系统存在中心遮拦,光管中心视场的应用受到限制。离轴两镜光管的视场不大,当视场增大时,需要增加校正像散、场曲和畸变的自由变量;并且焦距增大时,两镜系统间隔会随之增大,系统长度太长。而离轴三反系统,具有三个半径、二个间隔、三个非球面系数共八个自由变量,足以校正球差、彗差、像散以及场曲,并且可以大大减少系统长度。文中根据共轴三反系统理论,通过反射镜离轴设计了一个长焦距、大口径、宽视场的离轴光管。

## 1 初始结构计算

离轴三反射系统是在同轴三反射系统基础上,通过光阑离轴、视场离轴或者二者相结合的方式得到的<sup>[3-5]</sup>。同轴三反系统的结构示意图如图1所示<sup>[6-7]</sup>。

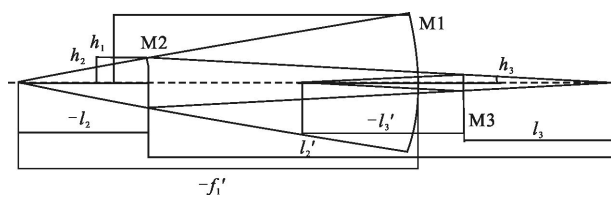


图1 同轴三反结构示意图

Fig.1 Layout of the coaxial three-mirror system

物体位于无穷远,即 $l_1=\infty, u_1=0$ 。主要结构参数为:次镜对主镜的遮拦比 $\alpha_1$ ,三镜对次镜的遮拦比 $\alpha_2$ ,次镜放大率 $\beta_1$ ,三镜放大率 $\beta_2$ ,主镜与次镜的间距 $d_1$ ,次镜与三镜的间距 $d_2$ ,三镜与像面之间的距离 $d_3$ 。 $f_1'$ 是主镜焦距, $f'$ 是系统的焦距。 $e_1^2, e_2^2, e_3^2$ 分别是三个镜子的非球面系数。光线从左方入射,满足符号

规则,即 $d_1<0, d_2>0, d_3<0$ 。结构参数满足:

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} = 1 - d_1\varphi_1 \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} \approx \frac{h_3}{h_2} = 1 - \frac{d_2\varphi_2 - d_1d_2\varphi_1\varphi_2 - d_2\varphi_1}{1 - d_1\varphi_1} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2}{u_2'} = \frac{-\varphi_1}{\varphi_1 - \varphi_2 + d_1\varphi_1\varphi_2} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} = \frac{u_3}{u_3'} = -1 + d_3\varphi_3 \quad (4)$$

式中: $\varphi_1=2/r_1$ ,代表主镜的光焦度; $\varphi_2, \varphi_3, \varphi$ 分别代表次镜、三镜和系统的光焦度。三反系统的焦距一般都比较长,对系统的长度都有一定的要求。为了使系统长度满足指定要求,将 $d_1, d_2, d_3$ 作为初始条件,求解同轴三反射系统的初始结构 $r_1, r_2, r_3$ 。根据多光组组合以及Petzval条件<sup>[5]</sup>,推导出下面三个求解初始结构的公式:

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \varphi\beta_1\beta_2 \quad (6)$$

$$d_3\varphi = \alpha_1\alpha_2 \quad (7)$$

将 $d_1, d_2, d_3, f'$ (中间成实像面 $f'>0$ ,不成实像面 $f'<0$ )作为已知量,实际设计中一般取 $|d_1|=|d_2|$ <sup>[8]</sup>,代入公式(5)、(6)、(7)可以求解出 $r_1, r_2, r_3$ 。根据求出的半径值回代求出 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 。可以将计算的初始结构输入zemax,同时把三片反射镜的二次系数设为变量,通过合适的评价函数,自动优化得到同轴三反射镜的非球面系数。

二次成像离轴三反射系统(COOK TMA系统)光阑设置在主镜,并适当地离轴,该系统中间成一次像,在一次像面处放置视场光阑,可以方便消除杂散光,缺点是需要很大的主镜离轴量才能保证次镜不遮光,次镜的二次曲面系数较大,不易加工。离轴三反系统常采用的是视场离轴的方式,即一次成像离轴三反射系统(Wetherell TMA系统)<sup>[9]</sup>,将光阑设置在次镜上,可实现大视场角设计,并且整个系统比较对称,中间不成实像。

## 2 设计实例

设计一个平行光管,焦距 $f'=10\text{ m}$ ,相对孔径 $D/f'=1/28.57$ ,视场角 $2^\circ \times 1^\circ$ 。光阑位于主镜前5m。选择主镜次镜间隔3m。

为了避免中心遮拦,对共轴系统的光阑进行离轴,离轴量的大小应保证:(1)入射到主镜的下光线

不能被次镜的上边缘挡光;(2) 经次镜反射到三镜的上光线, 不能被主镜挡光;(3) 经三镜反射入射到像面的上光线不能被次镜的下边缘挡光。反射镜的偏心会产生附加的像差, 主要产生离轴彗差和一定量的像散<sup>[1]</sup>, 可以通过像面偏心来校正。

在用 zemax 软件进行优化时, 可以对边界条件加以限制, 如中心间隔、边缘厚度等<sup>[11]</sup>, 设置的边界条件保证优化后的光学系统的可加工性与可装调性, 但是对离轴系统, 如果把离轴量或者角度设置为变量, 采用 zemax 默认的评价函数优化, 会发现离轴量和角度的优化结果都趋于 0, 系统趋向于同轴系统。为了合理选择离轴量的大小, 文中提出一种利用 zemax 软件自带的 Macros 扩展功能, 对离轴量进行限制和优化。

利用 ZPL 语言中的 RAYTRACE 函数, 需要在系统中引入两个辅助面(见图 2), 分别在主镜前的次镜位置加入辅助面 1, 再经三镜反射位于次镜位置加入辅助面 2, 如表 1 所示。编写 ZPL 语言时, 根据 ZPL 的命名规则, ZPL 程序命名为 ZPL01.ZPL。利用 RAYTRACE 函数, 其表达式为: RAYTRACE( $hx, hy, px, py, wavelength$ )<sup>[12]</sup>,  $x, hy, px, py$  分别是归一化的视场和光瞳, wavelength 默认是主波长。追迹光线 1 (0, 0.447 21, 0, 1) 和光线 2 (0, -0.447 21, 0, -1), 光线 1 代表上光线, 光线 2 代表下光线。利用函数 rayy 计算光线经过各个面的 y 轴坐标, 如图 2 所示。为了避

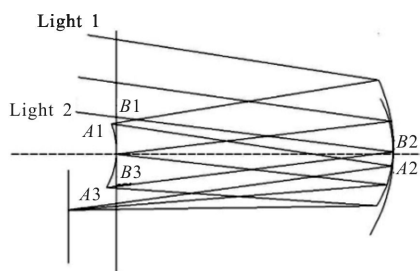


图 2 辅助面设计示意图

Fig.2 Layout with auxiliary surfaces

免光线遮拦, 以及留出光学零件和机械结构的余量, 分别计算图中三处位置光线 1 和光线 2 的 y 轴差值。在评价函数中, ZPLM 的两个变量, 第一个代表 Marcos 的 ZPL 命名编号, 这里 Mac# 应为 1, Data 分别为 0、1、2, 利用三个 ZPLM 函数调用返回值 optreturn0、1、2。操作数 OPGT 设置对应三个操作数

目标值为 60, 表示留出余量值大于 60 mm。这些操作数与其他评价操作数一起构成系统的评价函数, 再利用 zemax 的自动优化功能, 完成系统的优化设计。需要注意的是, 追迹的视场是归一化视场, 实际的上下光线与理想光线在各表面的高度存在差异, 但是其差值仍可作为判断是否遮拦光线的依据, 可以作为限制条件加入到评价函数中。

采用上述方法对初始结构进行优化, 优化后的光学结构参数见表 1。

表 1 优化后的光学结构参数

Tab.1 System parameters of optimized configuration

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	$-e^2$
1 Optical stop(STO)		2 000	
2 Coordinate break			
3 Auxiliary1		3 000	
4 Primary mirror	-10 211.51	-3 000	-1.483
5 Second mirror	-4 632.91	3 000	-3.127
6 Third mirror	-8 735.965	-3 000	-3.566
7 Auxiliary 2		-589.834	

采用 ZPL 语言优化后的离轴量为 -741.991 mm, 在光线可能遮拦地方, Macros 计算的结果为:  $\Delta 1 = B1 - A1 = 132.118 7 \text{ mm}$ ,  $\Delta 2 = B2 - A2 = 107.236 \text{ mm}$ ,  $\Delta 3 = B3 - A3 = 60 \text{ mm}$ , 满足光学和机械余量要求。光学系统结构如图 3 所示, 系统最大间隔约为  $f'/3$ ; 传递函数曲线如图 4 所示, 系统像质接近衍射极限。±y 方向全视场波像差 RMS 随视场变化曲线如图 5、图 6 所示, +x 方向全视场波像差如图 7 所示。图 8 为中心视场波像差, 中心视场波像差  $\text{RMS} = 0.001 8\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

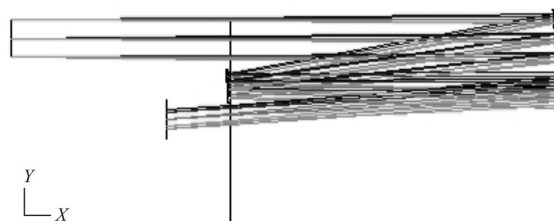


图 3 优化后光路图

Fig.3 Layout of optimized system

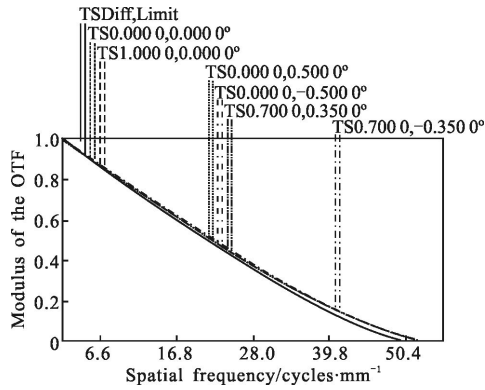


图 4 传递函数曲线

Fig.4 Modulation transfer function curve

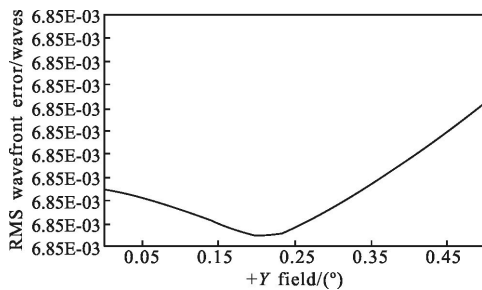


图 5 +y 方向全视场波像差

Fig.5 +y direction full-field wave-front error

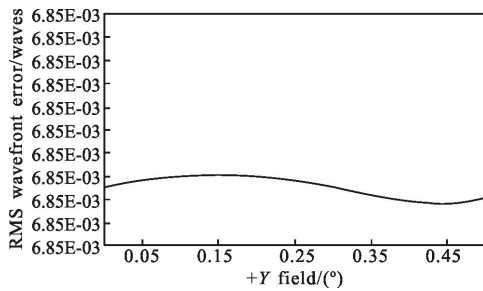


图 6 -y 方向全视场波像差

Fig.6 -y direction full-field wave-front error

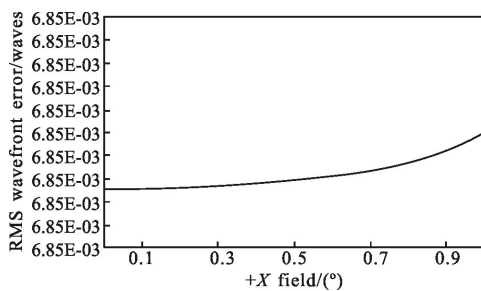


图 7 +x 方向全视场波像差

Fig.7 +x direction full-field wave-front error

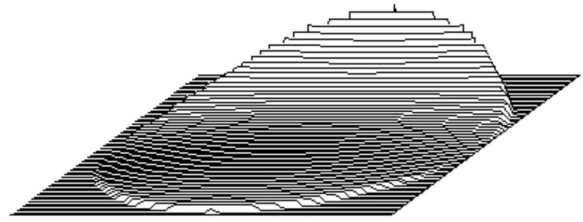


图 8 中心视场波像差

Fig.8 Central field wave-front error

### 3 系统分析

光学系统设计完成后,除了有良好的成像质量,也要有合理的公差分析,这样才能正确评判一个光学系统的优劣。利用 zemax 软件对该系统进行公差分析,表 2 给出一套公差。

表 2 系统公差

Tab.2 Tolerances of zoom system

	Primary mirror	Second mirror	Third mirror
Fringes	2	2	2
Conic	±0.03%	±0.05%	±0.5%
Thickness/mm	±0.02	±0.02	±0.02
Tilt/(")	±5	±20	±20
Decenter/mm	±0.02	±0.02	±0.02
Irregularity	±0.1	±0.1	±0.1

公差分析中利用后截距作为补偿,采用上面的一套公差进行分析,采用蒙特卡洛法 500 次追迹,90% 概率以上光学系统波像差为  $0.0048\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。表 2 发现三反射镜的公差要求都非常高,主镜的非球面系数和倾斜公差要求高于次镜和三镜,整体的装调难度远大于普通的光学系统。全系统的波像差如下公式:

$$\sigma_{\text{RMS}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_{\text{primary}}^2 + \sigma_{\text{second}}^2 + \sigma_{\text{third}}^2}$$

式中:  $\sigma_1$  装调产生的波像差;  $\sigma_{\text{primary}}$ 、 $\sigma_{\text{second}}$ 、 $\sigma_{\text{third}}$  为主、次、三镜的波像差;  $\sigma_{\text{mirror}} = 2\sigma_{\text{surface}}$ ,  $\sigma_{\text{surface}}$  是反射镜面型误差。三片反射镜面型误差为  $\lambda/100$  时,系统波像差为  $\sigma_{\text{RMS}} = 0.0349\lambda$ 。如果考虑环境等其他因素引入的波像差,系统的波像差会大于该计算值。可见,反射镜面型将是影响光学系统波像差的主要因素。从加工成本考虑,该系统反射镜的最大口径大于 500 mm,

大口径非球面反射镜的加工成本非常昂贵。因此, TMA 结构应用于平行光管遇到的主要问题将是口径反射镜的加工和高精度的装调。

## 4 结 论

文中推导出共轴三反射系统初始结构的计算公式, 并且提出一种适用于长焦距、宽视场平行光管的设计方法。在用 zemax 软件优化时, 给出一种采用 ZPL 语言优化离轴系统的设计方案, 利用光线追迹方法计算离轴量, 为离轴系统设计提供一种设计思路。设计了一个焦距  $f'=10\text{ m}$ , 相对孔径  $D/f'=1/28.57$ , 视场角  $2^\circ\times 1^\circ$  的离轴三反光管, 全视场波像差 RMS 优于  $\lambda/200$ , 为大口径、长焦距、宽视场光管设计提供了一种新的设计方法。

## 参考文献:

- [1] Gao Minghui, Li Lifu, Xu Jingli, et al. Design of a new kind of multi-waveband large aperture parallel light pipe[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 698-701. (in Chinese)  
高明辉, 李丽富, 徐敬礼, 等. 一种新型多波段大口径平行光管的设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 698-701.
- [2] Wang Lei, Wang Shouyin, Zhou Hu, et al. Basic principles and use method of collimator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 980-982. (in Chinese)  
王磊, 王守印, 周虎, 等. 平行光管的基本原理及使用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 980-982.
- [3] Xue Qingsheng. Design of wide field of view off-axis three-mirror system for hyperspectral imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 942-946. (in Chinese)  
薛庆生. 用于高光谱成像仪的大视场离轴三反系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 942-946.
- [4] Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, et al. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2093-2097. (in Chinese)  
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2093-2097.
- [5] Pan Junhua. Fabrication and Testing of Optical Asphere[M]. Beijing: Science Press, 1994: 2-5. (in Chinese)  
潘君骅. 光学非球面的设计加工和检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 2-5.
- [6] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope system of imaging spectrometers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 500-504. (in Chinese)  
李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 500-504.
- [7] Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0722002-1-0722002-5. (in Chinese)  
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002-1-0722002-5.
- [8] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)  
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- [9] Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)  
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
- [10] Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, et al. Design of optical system for space camera with long focal length, wide coverage and high resolution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 278-280. (in Chinese)  
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 278-280.
- [11] Yang Bo, Liu Chenglin, Ding Xuezhuan, et al. Design of off-axis TMA system with ZPL in Zemax [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(10): 559-561. (in Chinese)  
杨波, 刘成林, 丁学专, 等. 使用 ZPL 宏指令辅助设计离轴三反射镜系统[J]. 红外技术, 2010, 32(10): 559-561.
- [12] Zemax Development Corporation. ZEMAX Manual[Z]. 2005.