

文章编号 1674-2915(2011)06-0588-06

# 轻型高稳定性离轴非球面平行光管设计

刘磊

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了满足高精度相机在外场环境下的检测要求,采用碳化硅光学材料制作反射镜,碳纤/环氧树脂基复合材料制作遮光筒,设计了一套重量轻、自身精度高、温度稳定性好的离轴平行光管。在二者线胀系数保持二倍关系的情况下,在一定温变范围内保持精度的稳定性。经检测,口径为400 mm,焦距为8 m的离轴平行光管的温变为 $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,系统波像差为 $1/5\lambda$ (P-V值,  $\lambda = 632.8\text{ nm}$ )和 $1/27\lambda$ (RMS值),达到了设计要求,能够在外场环境下使用。

**关键词:**离轴非球面平行光管;碳化硅;碳纤/环氧树脂基复合材料

中图分类号:TH741.14; TH703 文献标识码:A

## Design of off-axis aspherical collimator with lightweight and high stability

LIU Lei

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy  
of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** To meet the testing requirements of high-precision cameras in the outer environment, an off-axis collimator with lightweight, high accuracy, and high temperature stability is designed. Silicon carbide and carbon fiber/epoxy resin matrix composite are adopted to make a reflector and a shading tube respectively for the off-axis aspherical collimator. The collimator can keep accuracy stability in their linear expansion coefficients in a twice at a certain temperature range. After testing, the wavefront aberration of the off-axis collimator with a diameter of 400 mm and a focal length of 8 m is  $1/5\lambda$  (P-V,  $\lambda = 632.8\text{ nm}$ ) and  $1/27\lambda$  (RMS) at a temperature range of  $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ . The collimator can be used in the outer environment.

**Key words:** off-axis aspherical collimator; silicon carbide; carbon fiber/epoxy resin matrix composite

## 1 引言

平行光管是相机在装调、检测过程中必要的光学仪器,主要用于实验室内相机装调、光学特性参数测量和像质评价,具体检测涉及光学系统目视分辨力、光学系统传递函数、相机整机动静态传递函数与信噪比、相机光学系统焦距与畸变等参数,并具有外场相机像质检测及焦面位置复测等功能<sup>[1-3]</sup>。

目前,市场上常见的平行光管多为透射式光管,这类光管的口径  $< 300$  mm,仅可以在可见光波段使用。而大口径、长焦距平行光管多采用同轴、球面反射光学系统,在光管的出光口处存在马蹄形反射镜的挡光问题,致使平行光管的精度降低。

本文针对大口径、长焦距被测相机研制了焦距  $> 7.5$  m,口径  $> 350$  mm 的平行光管。考虑被测相机的光学系统没有中心遮拦,成像像质较高,其传递函数接近衍射极限,而同轴反射式平行光管虽然可以满足长焦距、大口径的指标要求,但是存在中心遮拦问题,且自身光学系统的波像差大、精度低,不能满足高精度相机的检测要求,因此,

文中的平行光管采用无中心遮拦、自身波像差较小的离轴反射式光学系统。此外,由于外场环境温度变化大,长焦距平行光管在外场使用时会产生离焦现象,导致光管本身精度降低,从而影响被测相机的检测精度,所以本文设计的离轴平行光管口径大、焦距长、重量轻、温度稳定性高、自身精度高,可以满足高像质相机在实验室内装调、检测以及外场测试的要求。

## 2 平行光管的技术指标及参数

平行光管口径为  $400$  mm,焦距为  $8$  m,系统波像差  $< 1/4\lambda$  (P-V 值,  $\lambda = 632.8$  nm),  $1/25\lambda$  (RMS 值),使用温度为  $(20 \pm 10)$   $^{\circ}\text{C}$ 。

为了便于外场搬运,需要缩小平行光管的长度,减少光管体积。在光学设计上采用离轴三反光学系统,在与主镜间隔  $3\ 559$  mm 处和  $202$  mm 处分别设置  $2$  块平面反射镜,经过  $2$  次平面镜反射后,光路长度由  $8$  m 缩短为  $3.5$  m,该长度的光管非常有利于运输、搬运,更加适合外场使用。光管主镜采用系数  $K = -1$  的离轴抛物面,离轴角度为  $6^{\circ}$ ,主镜直径为  $415$  mm,光学系统如图 1 所示。

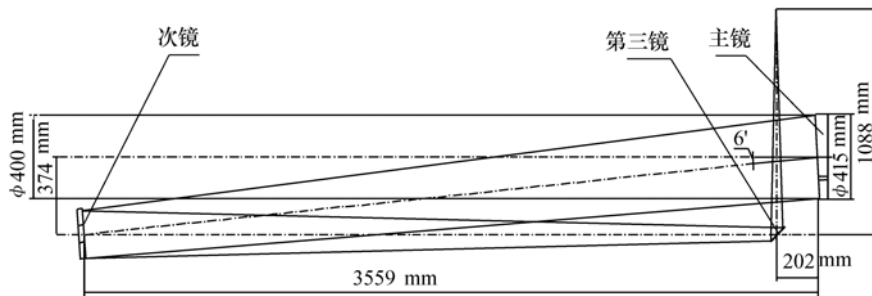


图1 离轴非球面平行光管光学系统

Fig.1 Optical system of off-axis aspheric collimator

从平行光管焦点处发出一束球面波,经光管第三镜、次镜及离轴抛物面主镜反射后变为平行光射出。

## 3 平行光管的组成

平行光管主要由  $1$  件直径为  $415$  mm 的离轴抛物面反射镜、 $2$  件平面反射镜、 $3.5$  m 长碳纤

维/环氧复合材遮光筒及机械连接件组成<sup>[4-7]</sup>,如图2所示。

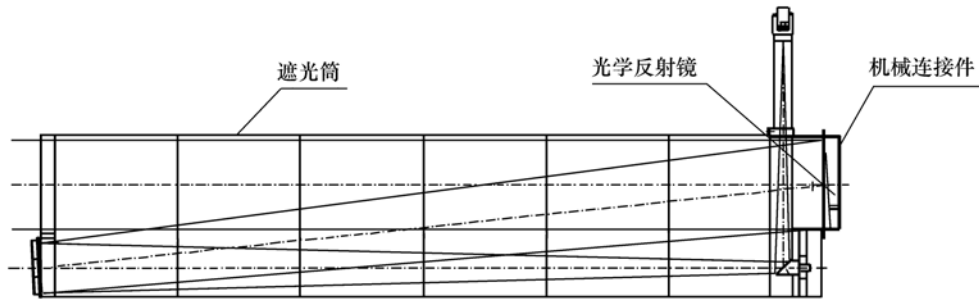


图2 平行光管主要组成

Fig. 2 Main components of collimator

### 3.1 碳化硅反射镜材料性能

传统的反射镜材料以微晶为主,从表1可以看出,新开发的碳化硅光学材料的弹性模量、比刚度、导热率、热畸变均大幅优于微晶玻璃材料,考虑到平行光管在外场使用时的环境温度变化较大,反射镜采用低热畸变、高比刚度的碳化硅能够

更好地保持反射镜的面型精度。另外,碳化硅反射镜在制备过程中可以利用浇注成型或者无压烧结前机械加工的方法进行轻量化处理,镜体轻量化率可达到60%,轻量化的反射镜在镜体刚度不减弱的情况下具有较轻的质量,能够有效地减少反射镜在自重影响下的变形。

表1 光学材料比较

Tab. 1 Comparison of optical materials

项目	新开发的光学材料					传统的光学材料		
	铍	硅	铝	钛	碳化硅	熔石英	微晶玻璃	零胀玻璃
密度 $\rho / (10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.85	2.3	2.7	4.5	3.05	2.2	2.5	2.5
弹性模量 $E / \text{GPa}$	280	157	69	118	400	70	92	92
比刚度 $(E/\rho) / (10^6 \text{ m})$	15.1	6.8	2.7	2.7	13	3.2	3.7	3.7
导热率 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$	157	169	220	9.6	185	1.38	1.2	1.46
线胀系数 $\alpha / (10^{-6} \text{ K}^{-1})$	11.4	2.5	23.9	8	2.5	0.55	0.1	0.05
热畸变 $(\alpha/\lambda) / (10^{-8} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1})$	7.2	1.6	11	83	1.4	40	8.3	3.3

### 3.2 碳化硅反射镜的计算

采用碳化硅材料的离轴抛物面主反射镜直径为415 mm,厚度为50 mm。碳化硅材料的密度为  $3.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为400 GPa,泊松比为0.16,轻量化后的镜体质量为4.5 kg。

在MSC. PATRAN环境下建立有限元模型<sup>[8]</sup>,选取8节点HEX8单元,共有1185个单元,1572个节点,在模型下部实施支撑固定并约束反射镜背部轴向位移,在垂直镜面-Y向施加1个加速度为 $g$ 的惯性载荷及10℃均匀温升或温降的温度载荷。经过分析,反射镜镜面P-V值为60 nm,RMS值为8 nm,满足镜面面型  $< 1/10\lambda$  (P-V值,

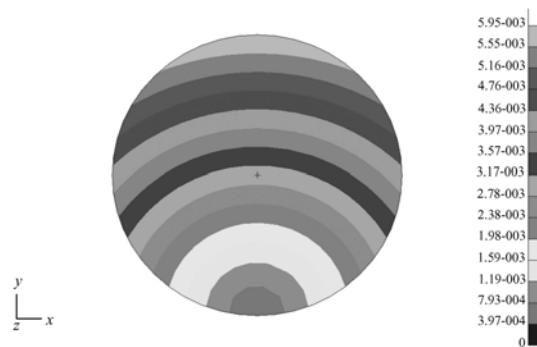


图3 反射镜变形图

Fig. 3 Deformation map of reflective mirror

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),  $1/50\lambda$  (RMS 值) 的指标要求。反射镜变形图如图 3 所示。

### 3.3 碳纤维复合材料的性能

连接各反射镜组件的遮光筒是平行光管中最大的支撑结构件,尺寸稳定性决定了光管的稳定性。

碳纤/环氧树脂基复合材料在航空、航天领域得到了广泛应用,该材料具有密度小、强度高、耐疲劳、寿命长、减振性能优异、易加工成型、尺寸稳定性好等优点<sup>[9-10]</sup>。

碳纤/环氧树脂基复合材料是以环氧树脂为基体,碳纤维为增强体的复合材料,它的密度为  $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,仅为铝合金密度的 60%,钛合金密度的 36%。相对钢件遮光筒,采用碳纤维复合材料的遮光筒的质量减少了 80%。碳纤维 T700 的抗拉强度可达到 4 900 MPa,抗拉模量可达到 230 GPa,该材料的比强度、比模量远远高于铝合金、钛合金。在交变载荷作用下,由于金属材料裂纹的形成和扩展而产生低应力破坏,而复合材料存在的纤维、树脂界面能够阻止裂纹进一步扩展。纤维和基体界面吸振能力强,振动阻尼大。利用对模模压成型工艺加工成型的遮光筒内外表面平整光洁、致密,在一定温度范围内,遮光筒的热变形可以达到最小或趋于零,使光管在恶劣的外场温度环境条件下严格保持尺寸的稳定性。

## 4 平行光管温度稳定性的设计及验证

点光源  $O$  位于平行光管遮光筒上,在初始状态,点光源  $O$  与反射镜的焦点重合。当温度变化时,反射镜的焦距发生变化,记为  $\Delta f$ ,焦点位置随之改变;另外,遮光筒的长度  $L$  也随温度的变化而变化,记为  $\Delta L$ ,点光源位置也随之改变。只有点光源与焦点始终重合,即  $\Delta f = \Delta L$ ,光管才不会发生离焦。在图 4 所示的同轴平行光管中:

$$\Delta f = f\alpha_2\Delta T, \quad (1)$$

$$\Delta L = L\alpha_1\Delta T, \quad (2)$$

初始状态下,  $f = L$ ,点光源与反射镜焦点重合。

式中:  $\alpha_1$  为碳纤/环氧树脂基复合材料线胀系数,  $\alpha_2$  为碳化硅材料的线胀系数,  $f$  为主反射镜焦距,

$L$  为遮光筒上点光源到反射镜面顶点  $A$  的距离。

当  $\alpha_2 = \alpha_1$  时,  $\Delta f = \Delta L$ ,点光源与焦点始终重合,光管不离焦。

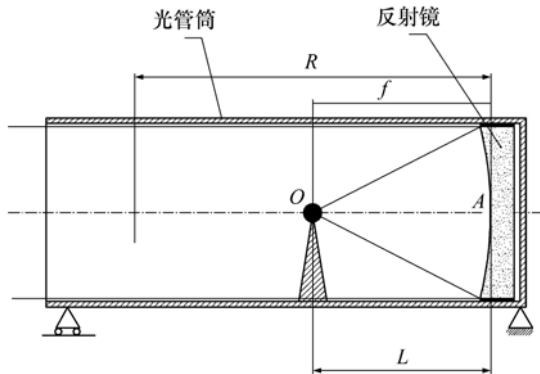


图 4 平行光管简图

Fig. 4 Sketch diagram of collimaor

由于图 1 中光路被次镜反射一次,  $\Delta L$  增加一倍,故  $\Delta L = 2L\alpha_1\Delta L$ 。

在温度变化的情况下,为使  $\Delta f = \Delta L$ ,点光源与焦点始终重合,则  $\alpha_2 = 2\alpha_1$ ,即碳化硅材料的线胀系数是碳纤/环氧树脂基复合材料线胀系数的 2 倍。为了保持光管在  $(20 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$  温度内的精度要求,上述两种材料的线胀系数不匹配性  $< 5\%$ 。

碳化硅材料的线胀系数不可改变,但是可以通过改变碳纤铺设角度来改变碳纤/环氧树脂基复合材料线胀系数,最终达到  $\alpha_2 = 2\alpha_1$  的设计要求。

从以上的计算可知,虽然外界温度变化了,但是点光源与焦点同步变化,始终重合,光管不离焦。

平行光管出口处放置平面反射镜,激光干涉仪从平行光管焦点处发出一束球面波,经光管三镜、次镜、主镜反射后变为平行光照到平面反射镜后按原路返回,进入激光干涉仪后,与干涉仪参考光相干形成干涉图像,经干涉仪软件处理后得到平行光管光学系统波像差。

经过检测,平行光管温变在  $(20 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$  内,其系统波像差为  $1/5\lambda$  (P-V 值,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),  $1/27\lambda$  (RMS 值),达到了设计要求(如图 5 所示)。

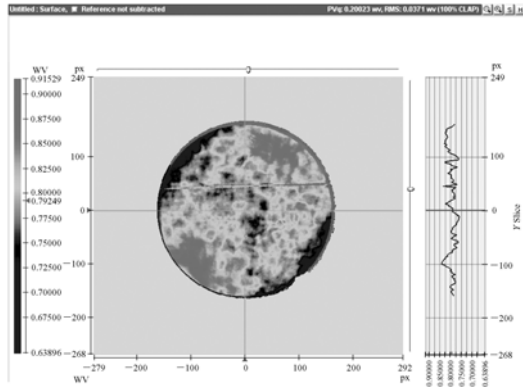


图5 平行光管系统波像差

Fig.5 Wavefront aberration of collimator system

## 5 结 论

本文研制了新的离轴平行光管,该光管采用高弹性模量、高比刚度、高导热率、低热畸变性能的碳化硅制作了反射镜;采用密度小、强度高、寿命长、易加工成型、尺寸稳定性好的碳纤/环氧树脂基复合材料研制了光管遮光筒。在二者线胀系数保持2倍关系的情况下,在 $(20 \pm 10)$  °C温度内离轴抛物面平行光管系统波像差可以保持在 $1/5\lambda$  (P-V值,  $\lambda = 632.8$  nm),  $1/27\lambda$  (RMS值),达到了设计要求。由上述材料做成的平行光管重量仅为50 kg,能够满足外场环境下的使用要求。

## 参考文献:

- [1] 常军,翁志成. 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):55-57.  
CHANG J, WENG ZH CH. Design of optical system in wide cover, abaxial space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1):55-57. (in Chinese)
- [2] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京:科学出版社,1994:42-88.  
PAN J H. *Design, Fabrication and Testing of Aspherical Optical Surface* [M]. Beijing: Science Press, 1994:42-88. (in Chinese)
- [3] 刘琳,薛鸣球,沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. 光学技术,2002,28(2):182-184.  
LIU L, XUE M Q, SHEN W M. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system [J]. *Opt. Technique*, 2002, 28(2):182-184. (in Chinese)
- [4] 叶露,王肇勋. 大口径长焦距平行光管主反射镜支撑与调整机构的研究[J]. 光学精密工程,2000,8(5):462-465.  
YE L, WANG ZH X. Supporting and adjusting for collimator primary mirror with large-aperture and long-focal length[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5):462-465. (in Chinese)
- [5] 吴清文,杨洪波,杨近松,等. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法[J]. 光学技术,2004,30(2):152-156.  
WU Q W, YANG H B, YANG J S, et al. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera[J]. *Opt. Technique*, 2004, 30(2):152-156. (in Chinese)
- [6] 张学军,李志来,张忠玉. 基于SiC材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):577-582.  
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(5):577-582. (in Chinese)
- [7] 陈永聪. 基于有限元法的大口径平行光管主反射镜支撑技术研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2007.  
CHEN Y CH. Mounting technology of large mirror in collimator based on FEM[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [8] 隋允康,杜家政,彭细荣. MSC. Nastran有限元动力分析与优化设计实用教程[M]. 北京:科学出版社,2004.  
SUI R K, DU J ZH, PENG X R. MSC. *Nastran Finite Element Dynamic Analysis and Optimal Design and Practical Tutorial* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 林再文,刘永琪,梁岩. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1181-1185.  
LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure[J]. *Opt. Preci-*

*sion Eng.*, 2007, 15(8): 1181-1185. (in Chinese)

[10] 田海英, 关志军, 丁亚林, 等. 碳纤维复合材料应用于航天光学遥感器遮光镜筒[J]. *光学精密工程*, 2003, 29(6): 704-706.

TIAN H Y, GUAN ZH J, DING Y L, *et al.*. Carbon fibre composite material used in space optical instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 29(6): 704-706. (in Chinese)

作者简介: 刘磊(1972—), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 主要从事空间相机结构设计等方面的研究。

E-mail: ccliul@163.com

---

## 《光学精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- \* 美国工程索引 EI 核心期刊
- \* 中国精品科技期刊
- \* 中文核心期刊
- \* 百种中国杰出学术期刊

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址: 长春市东南湖大路 3888 号

邮编: 130033

电话: 0431-86176855

传真: 0431-84613409

电邮: gxjmgc@sina.com

网址: <http://www.eope.net>

定价: 50.00 元/册