

# 大口径主焦点式光学系统轻量化结构设计、分析与试验

王富国, 杨飞, 陈宝刚, 李延伟

(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:** 针对主焦点式光学系统的特点, 对某 $\phi 700$  mm极轴式望远镜光机结构部分采用模块化设计, 分别对主镜室组件、连接镜筒和校正镜筒和全系统结构进行了有限元分析与优化, 使系统总重不超过700 kg, 系统弯沉不超过4"。利用平行光管检测系统像质表明, 系统80%能力集中度在 $4 \times 4$ 个像元以内, 系统像质理想, 符合设计要求, 说明该结构设计合理, 同时模块化的设计使装调方便简单。

**关键词:** 主焦点; 模块化; 有限元分析

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2011)01-0004-05

## Lightweight Structure Design, Analysis and Test of Larger Aperture and Prime Focus Optical System

WANG Fu-guo, YANG Fei, CHEN Bao-gang, LI Yan-wei

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

**Abstract:** Based on the characteristic of prime focus optical system, we adopt modularization design of a  $\phi 700$  mm polaxis telescope optomechanical structure. Finite element analysis and optimization on primary mirror cell component, joint cylinder, corrective lens cylinder and the whole system structure were carried out. As a result, the whole system weight is less than 700 kg, and the system flexure doesn't exceed 4". The system image quality is tested by collimator, and the result indicates that the system 80% energy concentrate degree is in  $4 \times 4$  pixel; the system image quality is perfect, satisfying design target; the optomechanical structure is reasonable; the modularization design makes the assembly and adjustment is convenient and simple.

**Key words:** prime focus, modularization, finite element analysis

### 引言

主焦点式光学系统具有大视场、大相对口径和损失光能较少等特点, 一般都在焦点前加入数块透镜组成像场校正透镜, 扩大可用视场和消除像差等, 在透镜组的末端装有成像系统。

主焦点光学系统中, 如果反射镜的形状是旋转抛物面, 这种系统就没有球差。在理想像平面(近轴光线的像平面)上, 以角度表示的彗差斑点的最长尺度为 $3.42W/16$ ,  $A$ 是反射镜的相对口径,  $W$ 是天体离开光轴的角距离。这样的主焦点系统只适于作单颗星的分光、测光和小视场暗弱天体的观测。有的主焦点系统, 反射镜并不是抛物面的, 例如R-C望远镜的主镜就属于这种类型, 这种系统不仅有和抛物面镜相同的彗差, 而且有球差, 但只要在焦点前加入一块校正透

镜就可以消除球差。不论抛物面镜或非抛物面镜的主焦点系统, 都可以在焦点前加入数块透镜组成像场校正透镜, 扩大系统的可用视场。同时由于主焦点位置处在入射光路中, 为避免挡光过多, 不能安置较大的终端设备。

主焦点光学系统由于校正镜组和成像系统都在镜筒的前端, 自身的重力造成的弯沉比较大, 在设计时要进行充分的有限元分析, 以使得结构即满足刚度要求, 又满足轻量化要求。本文以某 $\phi 700$  mm光电平台为对象, 该光电平台为极轴式结构, 由于系统的结构特点, 从结构的总体重量以及刚度和稳定性等方面考虑, 要求限制光学系统和四通的重量, 以减小赤经轴的负载。因此四通部分采用铸铝材料, 在四通实现轻量化的同时, 要求光学系统的重量不超过700 kg(含主镜), 这样才能保证四通在负载时的刚度和谐振频

收稿日期: 2010-11-19

作者简介: 王富国(1979-), 男, 汉族, 山东单县人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为光机系统设计与仿真。

基金项目: 863计划资助项目

率。这就要求光学系统既要减轻重量,又要保证一定的刚度,本文基于上述要求,对 $\phi 700\text{ mm}$ 主焦点式光学系统的结构进行了优化设计与分析。

### 1 设计思想和系统组成

主焦点式光学系统由于不存在库德光路,成像系统位于光路中,这样光学系统的机械结构就自成一个单独的系统,可以实现模块化设计,在光学系统单独装调完毕后,再整体和四通连接,这种模块化设计的优点使得整机装调变得简单,如果是批量生产,还具有互换性。

光学系统的结构主要包括以下几个组成部分:主镜室组件、连接筒组件、校正镜筒组件、校正镜组件、调焦组件等,如图1所示。主镜室组件要保证主镜指向任意方向时,其面形均满足设计要求,连接镜筒连接在四通上,校正镜筒上安装有校正镜组件和调焦组件,重量较大,而且距离安装位置较远,力臂长,会造成较大的弯沉<sup>[1]</sup>。

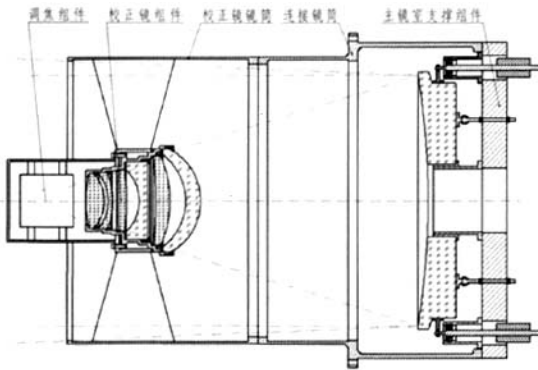


图1 光学系统结构示意图  
Fig.1 Optical system structure diagram

### 2 主镜室组件设计与分析

主镜室部分包括底支撑、侧支撑、芯轴组件、防翻转和防旋转结构等,底支撑采用9点whiffle tree结构,这种支撑形式结构简单,易于实现力学平衡,9个支撑点的位置也都经过优化分析,以达到对主镜面形的最佳支撑效果<sup>[2-4]</sup>。关于侧支撑结构和一般的经纬仪的侧支撑不同,主要是由于极轴式结构不同于地平式结构,极轴式结构的方位轴——赤经轴和竖直方向有一定的夹角,所以当赤经轴旋转时,为了使侧支撑的支撑效果不变,要求侧支撑结构必须均匀分布。本文中的侧支撑形式采用杠杆平衡重的结构形式。

主镜室中主要的部件是主镜室底板,对最初的设计进行有限元分析优化后,确定主镜室底板的轻量化

形式后,建立主镜室组件的有限元模型,模型采用六面体单元,共划分单元25383个,如图2所示。分析主镜在支撑状态下的面形。主镜重量约70 kg,加上底支撑的重量,如果每个支撑点(共3个支撑点)施加40 kg的载荷,主镜室水平放置时最大变形是3.85  $\mu\text{m}$ ,图3为主镜放在主镜室中,水平状态下主镜室的变形云图。去掉刚体位移后的主镜面形RMS为8.2 nm,图4为主镜在竖直状态下变形云图。

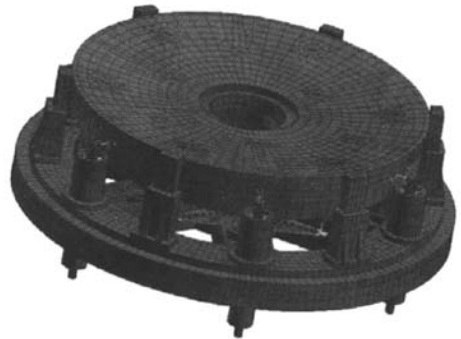


图2 主镜室的有限元模型  
Fig.2 Primary mirror cell finite element model

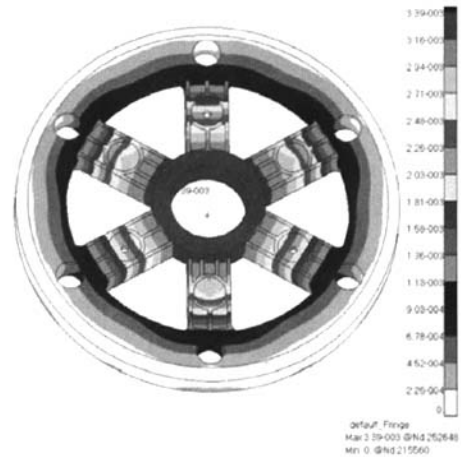


图3 主镜水平放置时主镜室变形云图  
Fig.3 Primary mirror cell deformation plot whit primary mirror in horizon

按照优化后的结构形式进行设计加工和装配后,利用4D干涉仪对主镜面形进行检测。需要说明的是主镜磨制完成后的面形裸镜检测结果是 $\lambda/30$ ,而后又进行镀膜、胶的粘结等过程,在主镜室中,最终的支撑效果是检测面形RMS达到0.0428 $\lambda$ ,如图5所示。前面所述的有限元分析是基于主镜面形是理想状况下的分析结果,而实际检测结果比裸镜时损失一部分面形,这和有限元分析结果从理想状态下变为8.2 nm

的情况是吻合的。一方面说明有限元分析是正确的，另一方面说明支撑效果是理想的，对于一个能量的光学系统，这样的面形是完全符合要求的<sup>[5]</sup>。

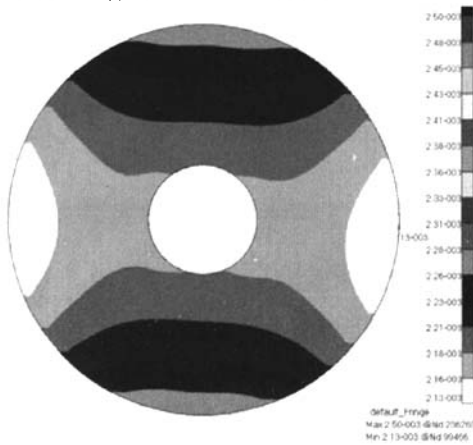


图4 主镜垂直放置时变形云图(检测状态)

Fig.4 Primary mirror cell deformation plot whit primary mirror in vertical (measurement state)

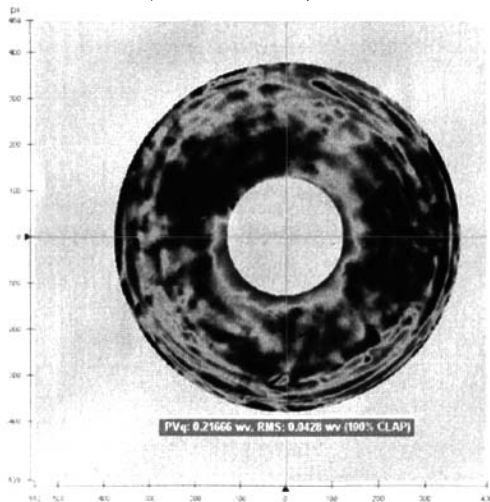


图5 主镜面形检测结果

Fig.5 Primary mirror measurement result

### 3 镜筒的设计与分析

镜筒部分包括两部分，连接镜筒和校正镜筒，连接镜筒前端连接校正镜筒，后端连接主镜室，而校正镜筒力臂长，负载大(校正镜组件和调焦组件)，这两部分是主要进行轻量化的部分，在满足刚度要求的前提下，对镜筒的壁厚和筋的分布进行了轻量化分析与设计。

#### 3.1 四翼梁的偏置分析与设计

四翼梁式支撑结构具有结构简单，遮拦面积小等优点，但是传统意义上的四翼梁式结构谐振频率低，

而据研究，对四翼梁进行适当偏置后，其动力学性能可以得到一定的提高<sup>[6]</sup>。设定载荷为60 kg，镜筒的壁厚为6 mm时，分析了四翼梁在重力垂直于光轴偏置和不偏置情况下的重量作用下的变形和一阶频率随。从表1中可以看出，四翼梁偏置越大其一阶频率得到提高，但是同时重量下的光轴变形也越大，综合考虑，选择四翼梁偏置5 mm进行设计。

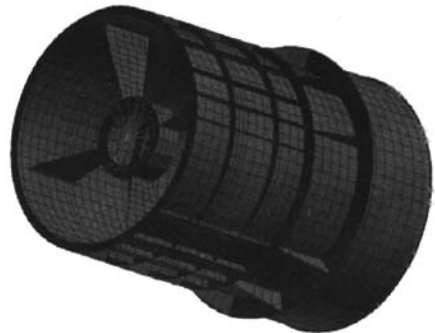


图6 镜筒的有限元模型

Fig.6 Mirror cylinder finite element model

表1 四翼梁不同偏置时的镜筒变形

Table 1 Mirror cylinder deformation of the crossed-plate type different offset

偏置情况	不偏置	偏置 5 mm	偏置 10 mm
镜筒变形	19.7 $\mu\text{m}$	17 $\mu\text{m}$	17.2 $\mu\text{m}$
一阶频率	121.61	133.42	134.25

四翼梁部分承担着校正镜组件和调焦组件部分，约60 kg左右的载荷，要求四翼梁既要满足负载时的刚度，又要尽量不增加遮拦面积。分析了四翼梁在四种不同厚度和两种不同位置时的变形情况，结果如表2，当四翼梁的厚度每增加2 mm，其遮光面积约增加3920 mm<sup>2</sup>，当厚度为8 mm时，其变形情况已经满足设计要求，因此选择8 mm的厚度作为设计值。

表2 四翼梁不同厚度时镜筒的变形

Table 2 Mirror cylinder deformation of the crossed-plate type different thickness

四翼梁的厚度/mm	6	8	10	12
重力垂直与光轴/ $\mu\text{m}$	19.79	19.76	19.72	19.70
重力平行与光轴/ $\mu\text{m}$	16	15.5	15.2	15

#### 3.2 连接筒和校正镜筒厚度的分析与设计

连接筒后端连接主镜室，前端连接校正镜筒和校正镜组件，中间固定在四通上，起着承上启下的作用，两端的载荷均比较大，要保证两端的弯沉一致，才能保证主镜的光轴和校正镜的光轴同轴<sup>[1]</sup>。连接筒后端的载荷为250 kg，前端载荷设为160 kg，分析连接筒在不同壁厚时的变形，结果如表3所示。要求连

接筒的重量不要超过 200 kg, 因此按照分析结果选定连接筒前端壁厚 10 mm, 后端壁厚 12 mm。

表 3 连接筒不同壁厚时的变形

Table 3 Connecting mirror cylinder deformation in different thickness

	前端壁厚 8 mm	前端壁厚 10 mm
后端壁厚 10 mm	16.8 μm/185.8 kg	16.6 μm/194.3 kg
后端壁厚 12 mm	16.5 μm/198.6 kg	16.3 μm/207.3 kg

校正镜镜筒的主要负载是校正镜组件和调焦组件, 由于载荷的位置距离安装面较远, 所以弯沉大, 必须进行轻量化, 要求镜筒和校正镜组件以及调焦组件重量不超过 160 kg。建立整个光学系统的有限元模型, 分析在校正镜镜筒不同壁厚, 调焦组件和校正镜组件载荷为 60 kg 时, 整个光学系统结构的最大变形, 分析结果如表 4 所示。分析表明整个光学系统结构的最大变形发生在四翼梁的中间位置, 考虑到校正镜筒的重量, 选择校正镜筒壁厚为 6 mm 作为设计值。图 7 为经过优化分析后的整个光学系统在重力作用下的变形云图。

表 4 校正镜镜筒不同壁厚时的变形

Table 4 Correcting mirror cylinder deformation in different thickness

	6 mm	8 mm	10 mm
镜筒变形/μm	18.3	17.2	16.2
镜筒重量/kg	106	124.1	141.3

#### 4 检测结果验证

前面的部分只是对光机结构进行了有限元分析, 实际效果还需要实践验证, 因此待光机结构装配完成后, 对光学系统进行了装调检测, 为了检测整个光学系统像质, 搭建了如图 8 所示的实验平台。

由于主焦点光学系统的特点, 靶面在光路中, 如果通过人眼利用工具显微镜检测系统像质则无法克服人体散热带来的影响, 以及人眼观测的主观性等缺点, 因此本文采用了能力集中度的像质评价方法。

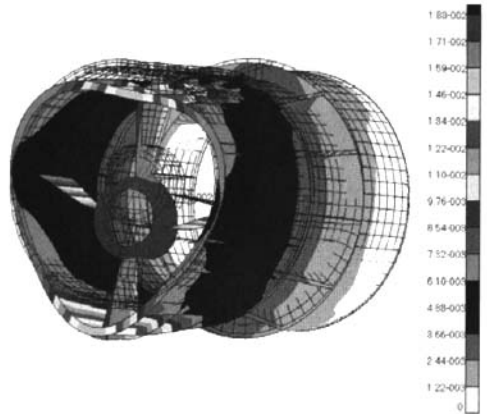


图 7 光学系统光机结构在重力作用下的变形云图

Fig.7 Optical system optical-mechanical structure deformation plot in gravity

整个光学系统镜筒部分通过四通连接在叉臂上, 叉臂放置在一个旋转平台上, 这样就可以实现镜筒的俯仰和旋转。在镜筒的前段是一个长 10 m, 口径 600 mm 平行光管, 在平行光管侧面的光源处放置一个 10 μm 的星点, 在光学系统的靶面处放置一个分辨率为每个像元 6 μm 的测试 CCD 相机, 从星点发出的点光源经过平行光管成像在 CCD 靶面上。当镜筒俯仰和旋转时, 在靶面的上下左右四个极限位置, 经过计算, 成像在靶面上的星点大小 80% 能力集中度均在 4×4 个像元以内, 符合光学设计要求, 说明主镜支撑效果良好, 结构设计合理。

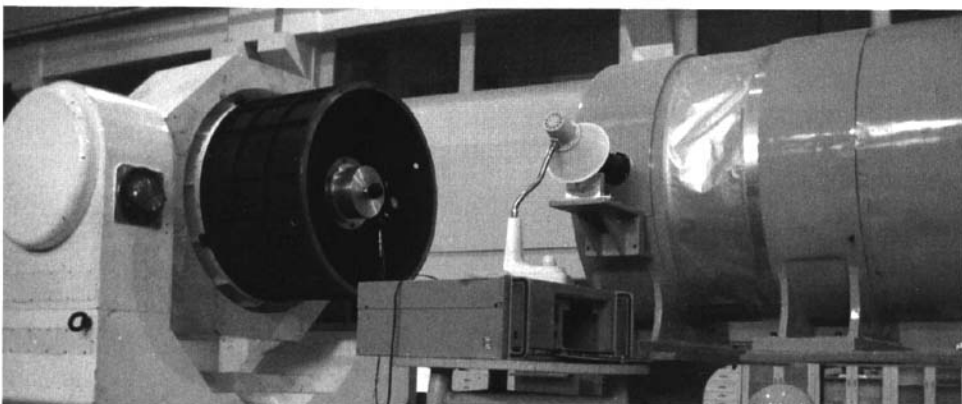


图 8 光学系统装调检测平台

Fig.8 Optical system measurement platform

## 5 结论

本文针对极轴式望远镜的光学系统的特点,提出了模块化设计的思想,对光机结构部分进行了研究,分析了主镜室的变形和主镜在主镜室中的变形情况,并通过4D干涉仪检测进一步证明了支撑效果良好。优化分析了连接镜筒和校正镜筒的结构形式,通过最终的平行光管检测系统像质,证明了整个光机结构设计合理。这种模块化的设计在极轴式望远镜中具有装调简单,互换性好的优点,值得推广。

## 参考文献:

- [1] 李志来, 薛栋林, 张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [2] 孙宝玉. 基于 CAE 的光学反射镜柔性结构设计与分析[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 103-106.
- [3] 刘春霞. 空间遥感仪器卡塞格林镜筒的设计及轻量化研究[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 253-256.
- [4] 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.
- [5] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向往支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.
- [6] 王富国, 张景旭, 杨飞, 等. 四翼梁式次镜支撑结构的研究[J]. 光子学报, 2009, 38(3): 674-676.

(上接第3页)

表2 宽视场弥散斑直径均方根值

Table 2 The RMS spot diameter of WFOV

温度/℃	视场	RMS/μm
-40	0.5	4.610
	0.8	4.828
	1	6.377
20	0.5	3.734
	0.8	3.254
	1	4.894
60	0.5	3.771
	0.8	4.033
	1	7.815

表3 窄视场弥散斑直径均方根值

Table 3 The RMS spot diameter of NFOV

温度/℃	视场	RMS/μm
-40	0.5	9.418
	0.8	6.973
	1	7.037
20	0.5	3.776
	0.8	4.372
	1	5.106
60	0.5	7.250
	0.8	7.724
	1	8.081

## 参考文献:

- [1] 陈吕吉. 一种紧凑的红外消热差光学系统[J]. 红外技术, 2007, 29(4): 203-205.
- [2] 郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1392-1395.
- [3] Allen Mann. Infrared Zoom Lenses in the 1990s[J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(1): 109-115.
- [4] 任德清. 红外双视场透镜的光学设计[J]. 红外技术, 1998, 20(3): 19-22.
- [5] 陈吕吉, 明景谦, 马琳, 等. 四片式非制冷长波红外热像仪双视场光学系统[J]. 红外技术, 2010, 32(1): 25-28.
- [6] Muhammad Nadeem Akram, Design of a multiple-field-of-view optical system for 3μm to 5μm infrared focal-plane arrays[J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(6): 1704-1714.
- [7] Muhammad Nadeem Akram, Design of a Dual Field-of-View Optical System for Infra-Red Focal-Plane Arrays[C]//*SPIE*, 2002, 4767: 13-23.
- [8] 梁玲, 张良. 折衍混合红外光学系统无热设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z): 120-124.