

## 采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑

范磊, 张景旭, 邵亮, 赵勇志

(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:** 轴向支撑对大口径主镜的定位及镜面变形有着重要的作用, 为了深入开展该课题的研究, 在传统机械 Whiffle-tree 支撑的基础上引入了轴向液压 Whiffle-tree 支撑。首先, 从三点运动学定位支撑原理出发, 介绍了 Whiffle-tree 支撑的特点与分类, 着重对比分析了液压 Whiffle-tree 和机械 Whiffle-tree 支撑的优缺点。进而, 根据液压 Whiffle-tree 的特点, 分析推导了其建模方法, 并运用该方法对一块 18 点液压轴向支撑的大口径主镜进行了静力学分析与优化, 拟合后镜面变形 RMS 值为 18.6 nm, 满足设计要求。同时通过对不同建模分析结果的对比, 验证了该建模方法的合理性和正确性, 为大口径主镜的轴向支撑分析提供了一种参考。

**关键词:** 大口径望远镜; 主镜支撑; 液压 Whiffle-tree; 有限元

**中图分类号:** TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2126-06

## Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic Whiffle-tree

Fan Lei, Zhang Jingxu, Shao Liang, Zhao Yongzhi

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

**Abstract:** Axial support system plays an important role in axial position and deformation of primary mirror. In order to profoundly develop such study, axial hydraulic Whiffle-tree support was introduced in the foundation of structure Whiffle-tree. First, according to the principle of kinematic constraint and support based on three axial points, the characteristic and category of Whiffle-tree system were introduced. Especially, the difference between structure Whiffle-tree and hydraulic Whiffle-tree was compared in detail. Then the model building method was elaborated, and an axial hydraulic Whiffle-tree support system for a large aperture primary mirror was selected to be calculated and optimized in statics. As a result, the mirror deformation is 18.6 nm which satisfies the design requirement and the rationality and accuracy of such modeling method are also certificated according to comparison between two different modeling methods.

**Key words:** large aperture telescope; primary mirror support; hydraulic Whiffle-tree; FEM

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-01-09

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新重大项目专项资金资助

作者简介: 范磊(1986-), 男, 博士, 主要从事光机结构设计与分析方面的研究。Email: fanlei1995@sina.com

## 0 引 言

随着地基光学望远镜口径的不断增大,为了保证主镜在重力作用下的面形精度,主镜支撑系统作为关键技术之一必须合理设计。一般情况下,主镜支撑系统由轴向支撑和径向支撑两部分组成<sup>[1]</sup>。特别当光轴指向天顶时,轴向支撑承担了主镜的全部质量,对面形精度的保持起主要作用。

国内众多学者对大口径主镜的轴向支撑进行了深入的研究,提出了很多支撑方法,其中基于运动学原理的机械 Whiffle-tree 支撑在 1~2m 级口径的主镜支撑中得到了相当广泛的应用<sup>[2-6]</sup>。其实,Whiffle-tree 支撑一般分为机械 Whiffle-tree 和液压/气动 Whiffle-tree 两种形式。这两种支撑形式原理相同,但实现的形式迥异,其中,液压/气动 Whiffle-tree 支撑系统简单,承载能力大,特别适合大质量和大口径的主镜支撑。

国外已能够成熟应用液压/气动 Whiffle-tree 支撑技术,其中具有代表性的有:英国 TTL 公司的新一代望远镜主镜(2.4 m)采用 36 点气动 Whiffle-tree 支撑<sup>[7]</sup>;CAT 薄镜面主镜(3.6m)采用 27 点液压 Whiffle-tree 支撑<sup>[1]</sup>;VLT 薄镜面主镜(8 m)采用 150 点液压 Whiffle-tree 支撑<sup>[8]</sup>。国内,在液压/气动 Whiffle-tree 支撑领域的研究较少,多集中于机械 Whiffle-tree 的分析与应用<sup>[2-6,9]</sup>。

为了掌握该项关键技术,也为我国更大口径望远镜的研制提供技术参考,文中从 Whiffle-tree 支撑的原理出发,首先,介绍了液压与气动 Whiffle-tree 之间的差别,接着,着重分析了液压 Whiffle-tree 与机械 Whiffle-tree 的优缺点;然后,给出了液压 Whiffle-tree 轴向支撑理论基础和分析方法;最后,针对一块 2 m 级实心主镜的液压 Whiffle-tree 支撑进行了详细的优化与分析对比,验证了文中的研究意义。

## 1 Whiffle-tree 支撑原理与分类对比

### 1.1 Whiffle-tree 支撑的原理与分类

Whiffle-tree 支撑是由三点定位支撑原理演变而来的。所谓三点定位支撑即主镜通过轴向均布的三个点来完成轴向定位和支撑,如图 1(a)所示。但随着口径的不断增大,三点支撑已无法满足镜面变形要求,因此需要扩展支撑点的数量。为了确保主镜不过

约束,同时保证支撑力的浮动性,可以通过杠杆机构或三角摇板机构来成比例地扩展支撑点。

图 1(b)和图 1(c)都属于机械 Whiffle-tree 中的典型支撑形式。图 1(b)中的支撑形式也称为 Grubb 支撑,是 1845 年由 Thomas Grubb 首次提出来的,其扩展的支撑点数为 9,后来 Hinder 于 1945 年提出了 18 个支撑点的 Hinder 支撑,如图 1(c)所示。

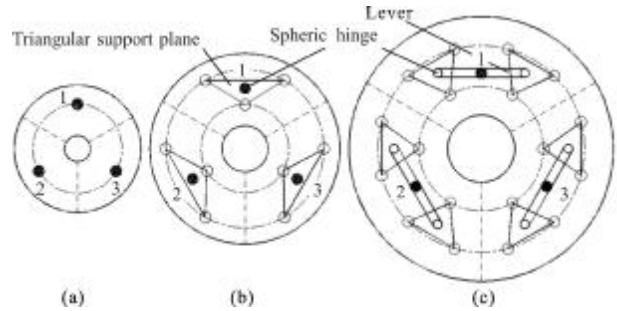
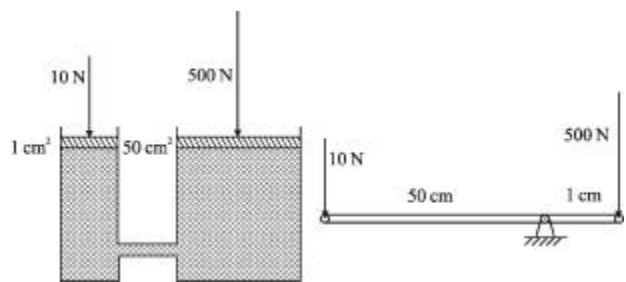


图 1 机械 Whiffle-tree 支撑示意图

Fig.1 Type of structure Whiffle-tree

液压/气动 Whiffle-tree 支撑是随着液压/气动技术的兴起而发展起来的。对于连通的液体/气体来说,相同作用面积上的作用力是相等的,如图 2 所示。根据这一定律,可以将上述连通的活塞模型称之为液压/气动杠杆,其功能和机械杠杆一致。因此,利用这种流体特有的性质,完全可以将主镜的三点定位支撑扩展为多点浮动支撑,及所谓的液压/气动 Whiffle-tree 支撑。



(a) 液压/气动杠杆 (b) 机械杠杆  
(a) Hydraulic/pneumatic level (b) Structural level

图 2 液压/气动杠杆原理示意图

Fig.2 Principle of hydraulic/pneumatic lever

就液压/气动 Whiffle-tree 支撑来说,气动 Whiffle-tree 与液压 Whiffle-tree 的支撑原理与结构形式基本相同,但由于气体具有一定的可压缩性,很难实现对主镜姿态的精确调整,因此,需要像机械 Whiffle-tree

的三个基本定位点一样, 额外设置三个硬点来定位主镜<sup>[7]</sup>。本着由浅入深的研究原则, 文中主要介绍液压 Whiffle-tree 支撑的相关分析。

如图 3 所示为 18 点液压 Whiffle-tree 支撑的系统示意图, 支撑系统分为三个 120° 均布的扇形支撑区, 每个扇形区都由一个体积调节单元来控制扇形区内的油液体积, 从而控制主镜的轴向姿态, 由于没有实际的机械结构, 也称之为虚定位点。设主镜重力为  $G$ , 则每个扇形区的合力均为  $G/3$ , 由于每个扇形区内都选用相同的液压缸且都用管路连通, 因此每个液压缸的支撑力都是相等的。其值为:

$$F_1 = F_2 = \dots = F_{18} = \frac{G}{18} \quad (1)$$

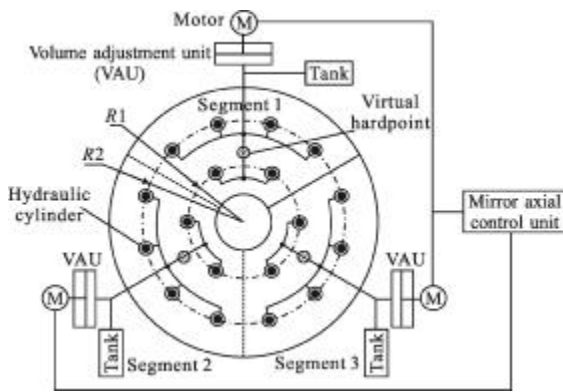


图 3 18 点液压 Whiffle-tree 支撑系统简图

Fig.3 18-point hydraulic Whiffle-tree support system

## 1.2 液压 Whiffle-tree 与机械 Whiffle-tree 的对比分析

对比图 1(c)与图 3, 同样是 18 点 Whiffle-tree 支撑, 都是由三个扇形区组成, 且支撑点支撑力都相同, 但两者却各有其特点:

(1) 定位方面。机械 Whiffle-tree 由三个具有实际结构的支点定位主镜; 液压 Whiffle-tree 由三个虚定位点来确定主镜姿态, 具体通过控制每个扇区内的液面高度来实现。

(2) 支撑方面。机械 Whiffle-tree 的支撑点须按照三角板或杠杆的比例增加, 受结构的限制较大, 同时受结构层次叠加的影响很难支撑 2 m 级口径以上的主镜; 液压 Whiffle-tree 可按照主镜支撑设计的需要随意增加支撑点, 排布较方便, 同时根据液压自身的特点, 承载能力较大。

(3) 装调方面。机械 Whiffle-tree 可通过研磨三个支点或通过设计三个螺母丝杠副来调整主镜, 但

由于三点完全承力, 故调整较困难; 液压 Whiffle-tree 可通过控制阀门来实现调整, 较为方便。

(4) 结构方面。机械 Whiffle-tree 结构随支撑点的增加而复杂, 但装调好后, 系统的稳定性很好; 液压 Whiffle-tree 相对来说结构简单, 但需要额外的液压设备和相应的各种控制阀, 且存在泄露、断电等危险。

对两者支撑的对比分析如表 1 所示。

表 1 机械 Whiffle-tree 与液压 Whiffle-tree 的比较  
Tab.1 Comparison between structure Whiffle-tree and hydraulic Whiffle-tree

Support type	Structure Whiffle-tree	Hydraulic Whiffle-tree
Distribution of support points	Restricted	Random
Load	Light	Heavy
Virtual or real (position points)	Real	Virtual
Adjustable capability	Bad	Good
Complexity	Complex	Simple
Stability	Better	Good
Automatic capability	Bad	Good
Mirror aperture	Small	Large

由比较结果可以看出: 液压 Whiffle-tree 支撑与机械 Whiffle-tree 支撑各有优缺点, 但对于大型望远镜主镜支撑来说, 液压 Whiffle-tree 优势较为明显, 结合国内外望远镜的支撑情况, 有必要深入地研究其主镜支撑的分析方法。

## 2 液压 Whiffle-tree 支撑的建模与分析方法

对于大口径望远镜主镜的支撑, 国内主要集中于机械 Whiffle-tree 支撑的设计与分析, 且绝大多数分析都采用有限元的方法<sup>[2-6]</sup>。设主镜支撑点的轴向位移为  $U_{Z_i}$ , 则分析时, 设计人员一般采用的边界约束条件为约束主镜轴向支撑点的位移<sup>[2-5]</sup>, 即令  $U_{Z_i} = 0$ , 或是提出施加相等的轴向支撑力, 但对应的轴向位移约束并未提及<sup>[6]</sup>。严格意义上讲, 这两种约束都是从一个侧面模拟了 Whiffle-tree 支撑的运动学特性, 具有一定的局限性。由上面的分析可知, 液压

Whiffle-tree 中每个支撑点的支撑力都相等,其不随支撑点位置的变化而变化,同时支撑点的位移应满足一定的杠杆原理。

针对液压 Whiffle-tree 支撑,欧南台 VLT 望远镜的主镜(8 m)支撑分析给出了一种更为合理的约束方法<sup>[10]</sup>。图 4 为液压 Whiffle-tree 支撑的理论分析图。图中将液压缸活塞杆的轴向刚度简化为刚度为  $K$  的弹簧;节点  $i$  的位移  $UZ_i$  代表液压缸活塞杆的位移,节点  $j$  的位移  $UZ_j$  代表液压缸与镜室连接处的刚体位移或安装误差值,节点  $i$  与节点  $j$  之间为间隙单元。

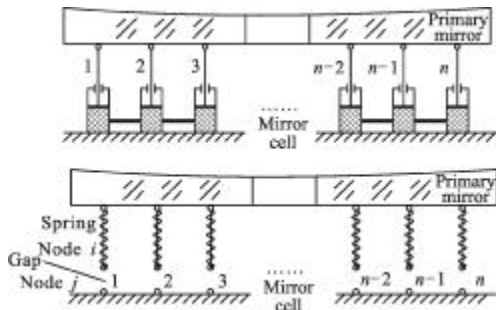


图 4 液压 Whiffle-tree 支撑的理论模型

Fig.4 Theory model of hydraulic Whiffle-tree

则液压 Whiffle-tree 系统有:

$$\sum_{i=1}^n \Delta U_i = 0 \tag{2}$$

其中:

$$\Delta U_i = UZ_i - \overline{UZ} \tag{3}$$

$$\overline{UZ} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n UZ_j \tag{4}$$

则公式(2)可以写成:

$$\sum_{i=1}^n \left( UZ_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n UZ_j \right) = 0 \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^n UZ_i - \sum_{j=1}^n UZ_j = 0 \tag{6}$$

在主镜支撑设计前期,支撑点位置的优化对镜面变形量的减小有着重要的作用,此时,往往假定主镜支撑处于理想状态:包括弹簧元的刚度  $K$  趋近于无穷大,即液压杆的轴向支撑刚度足够大;同时液压缸的刚体位移或安装误差为 0,即  $\sum_{j=1}^n UZ_j = 0$ ,则公式(6)可简化为:  $\sum_{i=1}^n UZ_i = 0$ 。

综上所述,利用有限元方法分析时,合理的液压 Whiffle-tree 支撑的边界条件应当是约束所有轴向支撑点的轴向位移之和为 0,同时保证所有轴向支撑点的轴向支撑力相等。同时,通过上述分析过程可以看出,该约束方法同样适用于机械 Whiffle-tree 支撑的前期分析,例如主镜支撑点的位置优化。

### 3 液压 Whiffle-tree 支撑的静力学分析与对比

为了深入探讨和验证上面的分析理论,选用一块直径为 2 040 mm 的实心主镜作为分析对象,分别采取不同的边界约束方法,进行了详细的静力学分析与对比。

主镜材料选用微晶玻璃,其弹性模量  $E=91000\text{MPa}$ ,密度  $\rho=2.53\text{g/cm}^3$ ,泊松比  $\nu=0.24$ 。轴向支撑系统如图 3 所示,采用 18 点液压 Whiffle-tree 支撑。主镜结构参数如表 2 所示。

表 2 主镜基本参数表

Tab.2 Parameters for the primary mirror

Aperture /mm	Diameter of center hole/mm	Thickness /mm	Radius of curvature/mm
2 040	400	190	6 085

#### 3.1 主镜的轴向支撑点的优化分析

利用有限元分析软件 ANSYS 对主镜进行参数化建模,有限元模型采用 solid95 单元。由于液压 Whiffle-tree 呈 120°对称,因此有限元模型选用对称约束的 1/3 模型。载荷和边界约束如下:轴向施加 1 g 的重力;对于轴向的 6 个支撑点,采用节点自由度约束方程命令 CE,建立轴向 6 个支撑点的自由度约束方程为  $\sum_{i=1}^6 UZ_i = 0$ 。具体模型结构如图 5(a)所示。

在有限元模型中,选用轴向支撑点的半径  $R1$  和  $R2$  作为优化变量,以镜面 RMS 值作为目标函数,借助 ANSYS 的 OPT 优化模块,采用多种的优化方法,经多次迭代,优化圆整后的的支撑半径为  $R1=457\text{mm}$ ,  $R2=875\text{mm}$ 。该液压 Whiffle-tree 支撑下的全镜面变形云图如图 5(b)所示,镜面 RMS 值为 18.58 nm,满足设计要求的  $\lambda/20(\lambda=632.8\text{nm})$ ,反求各个支撑点的轴向约束反力均为 643.45 N。

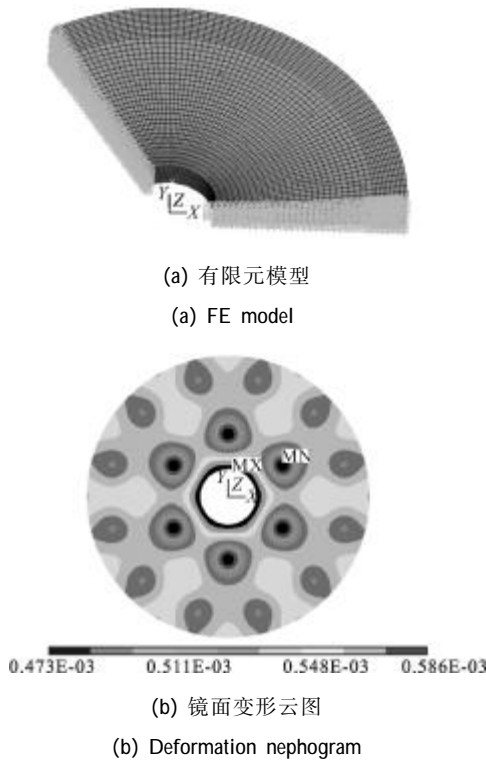


图 5 位移约束方程条件下的有限元模型与变形云图

Fig.5 FE model and deformation nephogram base on displacement constraint equation

### 3.2 轴向支撑的静力学对比分析

为了对比不同边界约束下的主镜变形差异,在不改变轴向支撑点位置和有限元网格模型的前提下,约束主镜支撑点的轴向位移  $U_z$ ,其他边界载荷同前

一模型相同,经计算,镜面的 RMS 值为 74.5 nm,其有限元模型与变形云图如图 6 所示。计算得到的支撑点的约束反力为  $F_{内圈}=621.74\text{ N}$  和  $F_{外圈}=654.30\text{ N}$ 。比较两种约束下支撑点的位移量和支撑力的大小,如表 3 所示。

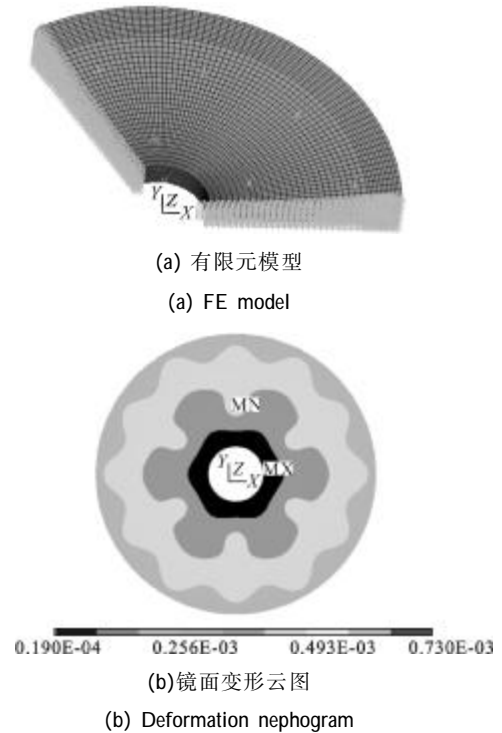


图 6 约束位移条件下的有限元模型与变形云图

Fig.6 FE model and deformation nephogram base on displacement constraint

表 3 两种约束条件下的结果

Tab.3 Results of two kinds of constraint methods

Displacement constraint methods	Displacement of support points/mm			Force of support points/N		
	Inner ring	Outer ring	$\sum U_z=0$	Inner ring	Outer ring	$F_{inner}=F_{outer}$
Axial displacement constraint equation	$9.9059 \times 10^{-3}$	$-4.9529 \times 10^{-3}$	$\sum U_z=0$	643.45	643.45	$F_{inner}=F_{outer}$
Axial displacement constraint	0	0	$\sum U_z=0$	621.74	654.30	$F_{inner} \neq F_{outer}$

由表 3 可以看出,建立轴向位移方程更加符合杠杆原理,更能真实地模拟液压 Whiffle-tree 支撑。由此也可以得出,对于一块相同的主镜,采用不同的支撑形式,其支撑点的优化模型也不同。这对于支撑系统的设计是至关重要的。笔者认为:第二种约束轴向位移的分析模型能够更好地模拟杠杆平衡重的支撑,即随着支撑圈的不同,按照所求的约束反力施加

对应的不等浮动支撑力,且按照这种模型理论上可以优化出主镜的最小轴向变形。

## 4 结论

文中从大口径主镜的 Whiffle-tree 支撑原理出发,引入了液压 Whiffle-tree 支撑系统,详细地对比分析了传统的机械 Whiffle-tree 和液压 Whiffle-tree

的差别,并针对液压 Whiffle-tree 支撑,介绍了一种更为合理的有限元模拟方法。

以一块 2 040 mm 口径的实心主镜为优化分析对象,优化了主镜支撑点的位置,对应的镜面变形 RMS 值为 18.58 nm,满足了设计要求。并对比分析了两种不同约束方法下的主镜变形结果,验证了之前的理论分析,也为大口径望远镜主镜的支撑研究提供了借鉴。

#### 参考文献:

- [1] Hans J K, Peter E, Martin S. Mechanical principles of large mirror supports [C]//SPIE, 2010, 7733:201-2012.
- [2] Sun Ning. Optimal design of support system for a 1m diameter primary mirror [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 644-648. (in Chinese)  
孙宁. 1 m 口径主反射镜支撑系统的优化设计 [J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 644-648.
- [3] Fu Jia, Zhang Jingxu, Wang Fuguo, et al. Application of Whiffletree for primary mirror lateral support [J]. Infrared Technology, 2012, 34(4): 209-212. (in Chinese)  
傅家, 张景旭, 王富国, 等. Whiffletree 结构在主镜侧支撑中的应用研究[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 209-212.
- [4] Fan Lili, Zhang Jingxu, Jiang Hao, et al. Design of the primary mirror support of equatorial telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 476-479. (in Chinese)  
范李立, 张景旭, 姜皓, 等. 极轴式望远镜主镜支撑设计 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 476-479.
- [5] Chen Yongcong, Hu Yongming, Li Yingcai. Displacement analyzing and support position optimizing of the main mirror with backside support[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(9): 1730-1733. (in Chinese)  
陈永聪, 胡永明, 李英才, 等. 背部支撑主反射镜的面形分析与支撑点优化[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1730-1733.
- [6] Xu Jiahui, Xia Lixing, Chen Cheng. Optimization analysis for the underside of the primary mirror by the finite element method [J]. Machinery Design & Manufacture, 2004, 3: 67-69. (in Chinese)  
徐加慧, 夏立新, 陈诚. 基于有限元法的主镜底支撑的优化分析[J]. 机械设计与制造, 2004, 3: 67-69.
- [7] Anthony M. Concept and design of the 2.0 m NGAT -The new generation of astronomical telescopes [C]//SPIE, 1998, 3352: 112-119.
- [8] Thierry H, Jean-Marc M, Stephano S. Design of tests of the VLT M1 mirror passive and active supporting system [C]// SPIE, 1998, 3352: 424-435.
- [9] Fan Lili, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 173-177. (in Chinese)  
范李立, 张景旭, 杨飞, 等. 极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 173-177.
- [10] Cui Xiangqun. Support system of large aperture thin primary mirror with active optics [D]. Nanjing: Nanjing Observatory, Chinese Academy of Sciences, 1995. (in Chinese)  
崔向群. 采用主动光学的大口径单块薄镜面支撑系统[D]. 南京: 中科院南京紫金山天文台, 1995.