

SiC 轻量化主镜液压 whiffletree 支撑系统的改进

邵 亮, 吴小霞, 杨 飞, 范 磊, 李剑锋

(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 2 m SiC 轻量化主镜设计了液压 whiffletree 被动支撑系统, 通过在轴向液压支撑点处并联杠杆配重机构的方式, 实现了不同支撑圈上轴向支撑力的优化分配, 将轴向支撑下主镜的镜面变形 RMS 值从 7.1 nm 优化到 4.8 nm。针对 SiC 主镜热膨胀率大的特性, 提出了采用具有热解耦能力的切向连杆结合液压 whiffletree 的侧向支撑系统, 并借助于有限元法预算出主镜光轴水平状态下侧向支撑引起的镜面变形误差 RMS 值为 39.7 nm。当温差为 20 °C 时, 轴向和侧向支撑结构作用下的主镜镜面变形误差 RMS 值仍保持在 4.8 nm, 验证了侧向支撑良好的热解耦能力。

关键词: SiC 轻量化主镜; 液压 whiffletree; 杠杆配重; 切向连杆

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3820-05

Improvement on hydraulic whiffletree support system for SiC lightweight primary mirror

Shao Liang, Wu Xiaoxia, Yang Fei, Fan Lei, Li Jianfeng

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

Abstract: Improved hydraulic whiffletree passive support system was designed for 2 m SiC lightweight primary mirror. The lever counterweight mechanism connected to hydraulic whiffletree mechanism was used for axial support system. The axial support force optimization distribution in different support points was accomplished by the axial support system, and the root-mean-square (RMS) of the mirror distortion resulted by axial support system was improved from 7.1 nm to 4.8 nm, which was optimized by finite element analysis (FEA) method. Considering the large thermal expansion coefficient of SiC, tangent link mechanism which owned adaptive bucking thermal stress attribute combined with hydraulic whiffletree mechanism was applied to the lateral support system for SiC primary mirror. When telescope was printed to horizon, the mirror distortion caused by the lateral support system was analyzed, and 39.7 nm RMS of the primary mirror deformation was obtained by FEA. As the ambient temperature raised from 20 °C to 40 °C, the mirror distortion resulted by the axial support and lateral support system was still kept on the level of 4.8 nm RMS. Analysis result indicates well thermal adaptability of the improved lateral support system.

Key words: SiC lightweight primary mirror; hydraulic whiffletree; lever counterweight; tangent link

收稿日期: 2014-03-13; 修订日期: 2014-04-06

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新项目专项基金(Y3C122E130)

作者简介: 邵亮(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事大口径望远镜主镜支撑方面的研究。Email: shaol@ciomp.ac.cn

0 引言

地基望远镜中的大口径 SiC 轻量化主镜的刚度较大,但轻量化设计会使得镜体的局部刚度略有下降,即轻量化主镜对支撑应力的敏感度增大,因此轻量化反射镜的支撑点一般都设置在加强筋的交汇处。大口径轻量化主镜的支撑方式和结构形式对支撑引起的镜体局部应力起着决定性的作用,并在一定的范围内影响主镜的面形精度^[1]。常用被动支撑方式中,液压 whiffletree 机构具有结构简单紧凑,支撑点排布灵活,支撑稳定等特点,被广泛应用于大口径望远镜的主镜支撑中。3.5 m WIYN、8.1 m GEMINI、8.2 m VLT 等望远镜主镜主动支撑系统中的被动支撑部分均采用了液压 whiffletree 支撑结构,通过液压系统实现主镜的定位并承担大部分的镜重,主动支撑部分只负责承担小部分镜重和主动校正力的输出^[2-4]。液压 whiffletree 的支撑作用大大降低了主动支撑元件力促动器的工作行程要求,这有利于校正力精度的提高。

针对大口径 SiC 轻量化主镜比刚度高,热膨胀率大的特性^[5],通过分析液压 whiffletree 支撑系统的工作原理,对现有的 2 m SiC 轻量化主镜进行液压 whiffletree 支撑系统的设计,并提出采用杠杆配重的方式对支撑力进行优化分配,借助于有限元分析预算支撑系统对镜面面形的影响。

1 液压 whiffletree 支撑原理

主镜被动支撑结构需要满足静定机构原理,六自由度定位,即满足方程:

$$F=6(n-1)-\sum_{i=1}^g(6-f_i)=0 \quad (1)$$

式中: F 为系统自由度总数; n 为部件数; g 为铰链个数; f_i 为第 i 个节点的自由度。

液压式 whiffletree 机构的基本功能和原理与机械式 whiffletree 机构完全一致,其区别在于液压 whiffletree 机构通过每个液压联通区形成虚拟定位点,而机械式 whiffletree 机构具有实际定位点^[6]。图 1 为主镜轴向支撑的液压 whiffletree 机构简化模型。

每个液压联通区域的各支撑点的空间几何中心位置即为该区域的虚拟定位点,且组内每个支撑点位移均有固定的约束关系,因而支撑机构可简化为节点位移约束方程:

$$\begin{cases} \Delta U_i = UZ_i - \overline{UZ} \\ \overline{UZ} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n UZ_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\overline{UZ} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n UZ_j$ 为该组的虚拟定位点位移。每 1 组关系式形成 1 个约束关系,即对应 1 个液压联通回路,如 VLT 望远镜中通过 6 套液压联通回路对主镜定位,其主镜存在 6 组上所述约束关系^[7]。

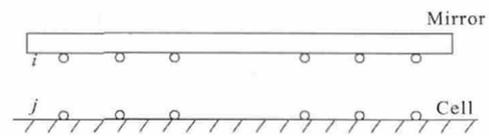


图 1 液压 whiffletree 机构示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of hydraulic whiffletree mechanism

2 2 m SiC 轻量化主镜的液压支撑

2 m 轻量化主镜镜坯及结构形式见图 2,2 m 轻量化主镜的液压 whiffletree 支撑系统包括轴向支撑系统和侧向支撑系统。该轻量化主镜所采用的 SiC 材料的相关参数如下。密度 ρ 为 $3.05 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$;弹性模量 E 为 392 000 MPa;泊松比 μ 为 0.25;线胀系数 α 为 $2.5 \times 10^{-6} / \text{K}$;比刚度 E/ρ 为 $13.1 \times 10^9 \text{ mm}$ 。

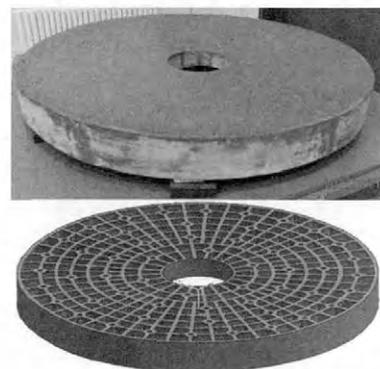


图 2 2 m SiC 轻量化主镜镜坯及结构模型

Fig.2 2 m SiC lightweight mirror blank and structure model

2.1 轴向支撑

主镜轴向支撑系统要求具有稳定的支撑刚度并

能保证良好的支撑面形精度。常用的被动式支撑机构有 whiffletree 结构以及杠杆配重结合硬点这两种方式,前者具有较好的轴向支撑刚度和定位精度,但面形精度较后者稍差;后者虽然面形精度水平好于前者,但支撑刚度较差^[8],易受外界扰动。设计中采用液压 whiffletree 机构结合杠杆配重支撑方式,可同时兼顾轴向支撑刚度及面形精度要求。

如图 1 所示,该主镜设有 54 个轴向支撑预埋定位孔。针对该主镜设计的轴向液压支撑点的分布如图 3 所示,通过 3 个联通的液压回路形成轴向液压 whiffletree 机构,完成对主镜的轴向支撑 3 个自由度 (RX、RY、TZ)的约束。

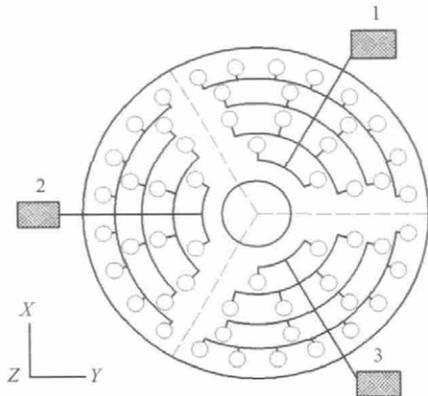


图 3 轴向液压 whiffletree 支撑系统

Fig.3 Hydraulic whiffletree of the axial support system

液压 whiffletree 支撑系统在每个轴向支撑点处输出的支撑力是相同的。主镜水平,54 个轴向支撑点均匀承担镜重时,镜面变形云图如图 4 所示。此时支撑结构引起的镜面面形误差 RMS 值为 7.1 nm, PV 值为 31.2 nm。

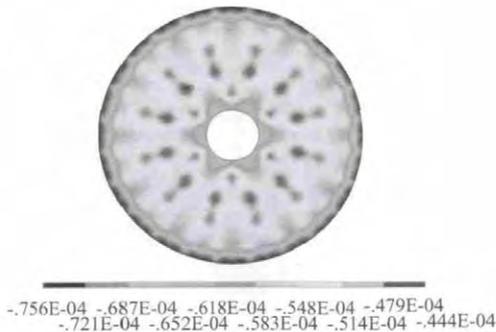


图 4 轴向支撑下的镜面变形云图

Fig.4 Mirror distortion resulted by axial whiffletree support system

由分析计算可知,该轻量化主镜在采用传统的支撑点等支撑力分配方式进行轴向支撑时并不能获

得最佳的支撑效果,即不同支撑圈上支撑点实际所需承担的镜重应是不同的。对不同支撑圈上支撑点的支撑力进行重新的优化分配,最终可以获得更好的支撑效果。

如图 5 所示,经优化后,镜面面形误差 RMS 变为 4.8 nm,PV 值变为 20.9 nm。优化后主镜 4 圈支撑圈上各点的支撑力输出分别为 $F_1=64.2\text{ N}$, $F_2=56.7\text{ N}$, $F_3=48.9\text{ N}$, $F_4=71.4\text{ N}$ 。

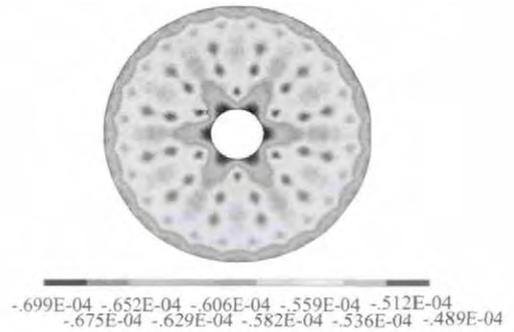


图 5 轴向支撑优化后镜面变形云图

Fig.5 Mirror distortion resulted by optimum axial support forces

实现轴向各支撑圈上支撑点输出支撑力的不同方法见图 6 所示^[6]。

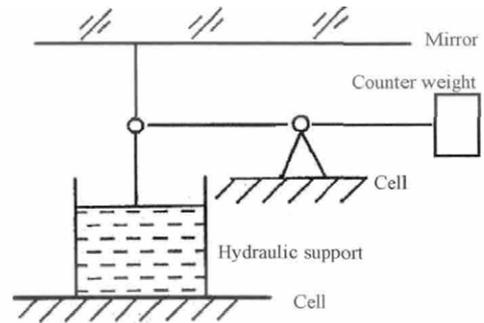


图 6 液压 whiffletree 结合杠杆配重机构示意图

Fig.6 Diagrammatic sketch of hydraulic whiffletree mechanism connected with lever counterweight

在每个液压支撑点处并联安装杠杆配重机构。液压 whiffletree 负担大部分镜重(约 80%)并对主镜进行定位,杠杆配重机构承担少部分镜重,并通过调节不同支撑圈上杠杆配重机构输出力的不同来实现支撑力的优化分配,保证最佳的轴向支撑效果。改进后的轴向支撑在保证主镜具有较好的支撑面形前提下,将杠杆配重机构易受外界动态扰动的缺点降至最小。

2.2 侧向支撑

侧向支撑在实现对主镜的径向支撑和径向定位时不可对主镜产生额外的应力输入。SiC 轻量化主镜具有很好的比刚度,但热胀系数较大,即温度变化时主镜自身的径向热变形很大。这一特性要求大口径 SiC 轻量化主镜的侧向支撑机构在原理上必须具有较好的热解耦能力,能够满足主镜较大的径向热变形要求。

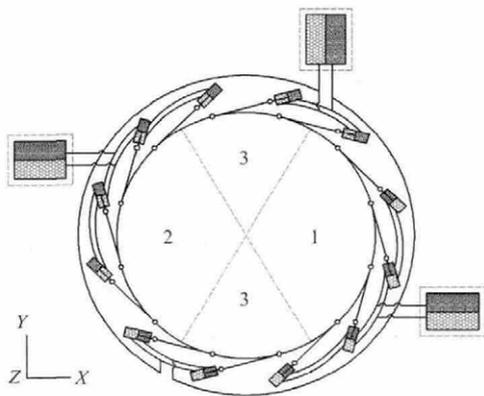


图 7 侧向液压 whiffletree 支撑系统

Fig.7 Hydraulic whiffletree of lateral support system

在主镜外圆周上采用切向作用的侧支撑机构,可在热膨胀时通过主镜绕光轴方向的微量旋转实现热应力的释放^[9]。综合液压 whiffletree 机构稳定的定位特性,改进后的侧向支撑形式中采用了切向杆与液压 whiffletree 机构相结合,如图 7 所示。将主镜侧支撑系统划分为 3 个区域,每个区域由一套密封油路联通,保证油路内油的总体积不变,即建立一个约束方程,3 套封闭油路即实现了该主镜中侧支撑约束的要求。

图 7 中,1、2 区域由 2 套油路分别独立联通,为主镜侧支撑提供支撑力输出,约束了主镜上下平移及绕光轴旋转的自由度 (TY、RZ);3 区域分成两块,仍由 1 套油路联通,其中上半区与下半区油缸布置恰好相反,该布置可实现:3 区域不参与主镜上下方向支撑,对于 1、2 区域支撑力输出无影响,同时限制主镜左右移动 (TX);3 个分区的自由度约束机构在理论上可实现互不干扰的支撑性能,即发生热变形时不必考虑自由度约束机构发生的相互挤压情况,从而无需通过主动调节即可释放热应力。

利用有限元法对主镜竖直状态下侧向支撑引起

的镜面变形情况进行分析。侧支撑有限元模型边界条件采用 3 组约束方程分别对 3 个液压区域进行模拟:1、2 区域切向杆边界节点沿切向位移之和分别为 0,3 区域上半区与下半区切向杆边界节点沿切向位移之差为 0。经计算,镜面变形云图如图 8 所示,此时的镜面面形误差 RMS 为 39.7 nm,PV 为 211.0 nm。

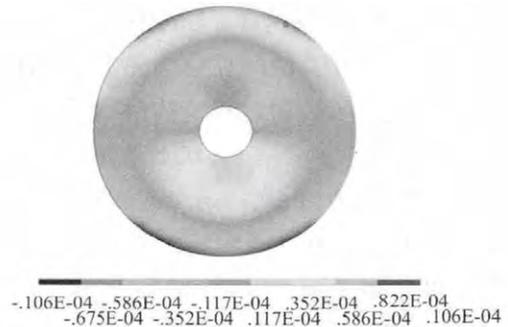


图 8 侧向支撑镜面变形云图

Fig.8 Mirror distortion resulted by lateral support mechanism

3 支撑系统的热解耦能力分析

当镜体温度与参考温度(20 ℃)存在 20 ℃的温差,即主镜温度达到 40 ℃时,若采用传统的、不具有热解耦能力的侧向支撑机构对该主镜进行相应的径向约束,可计算出支撑系统引起的主镜镜面热变形误差高达 RMS=4 296.5 nm,难以满足系统光学设计要求。当采用上述改进后的侧向支撑方式,可分析出 2 m SiC 轻量化主镜的镜面热变形云图如图 9 所示,此时镜面面形误差 RMS 保持在 4.8 nm。分析结果预示了该侧向支撑方式具有较好的热解耦能力。

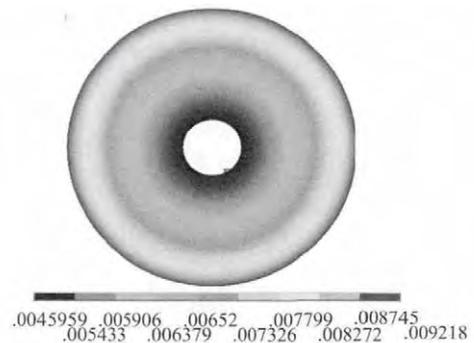


图 9 温差 20 ℃镜面变形云图

Fig.9 Mirror distortion at the 20 ℃ temperature difference

4 结 论

针对现有的 2 m SiC 轻量化主镜提出了液压 whiffletree 被动支撑方案。在轴向支撑系统中采用液压 whiffletree 机构结合杠杆配重附加力的方式,实现了不同支撑圈上轴向支撑力的优化分配,提高了主镜轴向支撑效果。优化后的轴向支撑机构引起的主镜面形误差 RMS 仅为 4.8 nm, PV 为 20.9 nm。

侧向支撑采用了切向杆结合液压 whiffletree 机构的形式,即实现了机构自身的热解耦能力又避免了过约束现象的发生。主镜竖直状态下侧向支撑引起的镜面面形误差 RMS 值为 39.7 nm, PV 值为 211.0 nm。

20 °C 温差下,改进后的轴向和侧向支撑共同作用下主镜热变形引起的镜面面形误差 RMS 仍保持在 4.8 nm,验证了改进后的侧向支撑机构具有良好的热解耦能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Matt J, Daniel R B. The WIYN 3.5 meter telescope project [C]//SPIE, 1994, 2199: 2-9.
- [3] Myung C. Gemini primary mirror support system[C]//SPIE, 1994, 2199: 223-238.
- [4] Thierry H, Jean-Marc M, Stephano S. Design and tests of the VLT M1 mirror passive and active supporting system[C]//SPIE, 1998, 3352: 424-435.
- [5] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
吴小霞,王鸣浩,明名,等.大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1243-1249.
- [6] Cui Xiangqun. Support system of large aperture thin primary mirror with active optics [D]. Nanjing: Purple Mountain 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:中国科学院南京紫金山天文台, 1995.
- [7] Fan Lei, Zhang Jingxu, Shao Liang, et al. Axial support for large aperture primary based on hydraulic Whiffle-tree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2126-2131. (in Chinese)
范磊,张景旭,邵亮,等.采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2126-2131.
- [8] Hans J K, Peter E, Martin S. Mechanical principles of large mirror supports[C]//SPIE, 2010, 7733: 77332O.
- [9] Shao Liang, Yang Fei, Wang Fuguo, et al. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229-234. (in Chinese)
邵亮,杨飞,王富国,等.1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 229-234.