

大孔径光学反射镜球铰支撑设计与分析

董吉洪

(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: 大孔径光学反射镜的支撑技术作为高分辨力相机的关键技术,既要兼顾反射镜的支撑刚度同时又要具有一定的柔性,能够适应温度变化对镜面的影响。大孔径光学反射镜采用球铰支撑可以极大地提高大孔径反射镜工作的可靠性,增强了反射镜的适应能力。本文通过几种反射镜支撑方式的比较,对大孔径光学反射镜球铰支撑的结构设计进行了论述,同时为了验证设计的可行性采用了非线性分析方法,对实际模型进行解算,确定了球铰支撑预紧力的选取范围为 5~1 500 N。通过模拟件试验验证了采用球铰支撑的反射镜能够满足倾斜量<5"的设计要求,使反射镜在一定的工作环境中能够稳定地工作,满足系统成像的需要。本文可为大孔径光学反射镜支撑技术提供一定的参考和借鉴。

关键词: 反射镜;支撑;球铰;非线性

中图分类号: TH703

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102709.0029

Ball Hinge Support Design and Analysis for Large Aperture Optical Mirror

DONG Ji-hong

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

Abstract: As a key technology of high-resolution camera, the support of large aperture optical mirror must have enough rigidity and some flexibility to fit for the mirror. It can adapt to the impact on mirror when the temperature changes. It can also greatly enhance the reliability and adaptation of the large aperture mirror in virtue of its ball hinge structure. In this paper, the ball hinge support of large aperture optical mirror is described through the comparison of some mirror supports. Meanwhile, the nonlinear analysis is adopted in order to verify the feasibility of the support. According to the simulation results, the preload of the support is confirmed within the range of 5~1 500 N.

The test results show that the ball hinge support of mirror can meet the tilt requirements of the mirror, which is less than 5". The mirror can work stably and meet the imaging requirements of the camera in a given environment. This paper has significant values in the support study of large aperture optical mirror.

Keywords: mirror; support; ball hinge; nonlinear

1 引言

在现代高技术条件下, 空间相机在战略侦察、导弹预警和商业探察方面扮演着日益重要的角色。优质轻型的大口径光学反射镜是空间相机核心关键元件, 而可靠稳定的反射镜支撑结构是保证空间相机成像质量的关键, 反射镜的支撑结构应具备如下特性^[1-7]: 1. 支撑结构能够克服反射镜因自重而引起的镜面变形; 2. 支撑结构能够保证一定温度范围内的镜面面形变化, 满足要求; 3. 支撑结构能够适应一定的装配应力, 保证装配过程不影响镜面面形。反射镜组件在使用环境的温度变化以及不可克服重力场等因素作用下, 都会引起参与成像的反射镜发生变形, 从而造成光学系统的波前差增大, 光学系统传递函数降低, 最终导致成像质量降低^[8-10]。合理的支撑方式会较大程度地减小环境因素对光学仪器的影响, 而在支撑方式中设置一定程度的柔性环节是行之有效的方法, 特别是在空间环境下的空间望远镜、空间遥感器中采用柔性结构就更加普遍。柔性结构有多种形式, 如柔性弹簧片、球铰支撑等。球铰支撑既能满足光学反射镜的刚性要求, 又能很好地克服使用环境温度变化的影响。

2 空间反射镜的几种支撑方式比较

空间反射镜根据镜体材料和结构形式的不同会有不同的支撑方式, 常用的支撑方式有以下4种: 中心支撑、周边支撑、侧面支撑、背部支撑^[11-13]。

中心支撑适用于口径较小的反射镜, 对于大口径的反射镜只能起到中心定位作用, 单独使用时镜面变形较大, 一般需要和其它支撑形式配合使用。

周边支撑是以光学反射镜的底面及某一个长边的侧面为定位基准面的一种支撑方式。周边支撑结构简单, 镜座外形尺寸大、质量大、无装配应力, 但因无柔性支撑, 当工作环境温度有变化时, 即使采用材料匹配措施, 仍可能存在热应力。因此, 周边支撑适用于温度相对稳定的工作环境。

侧面支撑是以光学反射镜的两个侧面(长条形反射镜)为定位基准的一种支撑方式。在反射镜对称的两个侧面上加工一定数量和深度的盲孔, 采用胶接方式在盲孔处放置与光学反射镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构, 借助柔性支撑结构将反射镜和镜座连接在一起。侧面支撑由于采用柔性支撑结构, 可消除因装配和环境温度变化产生的应力, 反射镜的质量通过侧面支撑结构卸载到镜座上。

背部支撑是以光学反射镜的背部为定位基准的一种支撑方式。在反射镜背部合适的位置加工一定数量和孔深的盲孔, 采用胶接的方式, 在盲孔中放置与光学反射镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构, 借助柔性支撑结构按一定的组合方式将反射镜和镜座连接在一起。

背部支撑是大口径反射镜使用最多的结构型式, 在三点背部支撑的基础上发展了若干形式。为了适应较宽的温度范围, 支撑结构通常采用柔性结构, 球铰形式的柔性结构是众多柔性支撑里面温度适应性最好的一种支撑结构。本文针对大口径反射镜的球铰支撑进行研究。

对于球铰支撑的分析方式, 由于其结构形式复杂, 采用经典解析算法是很难得到精确解答的。对于普通的采用柔性弹簧片柔性环节的分析, 因为其内部零件没有相对滑动的趋势, 故不用考虑摩擦,

一般采用线性算法即可完成。对于球铰支撑方式的有限元分析,必须针对其具体情况进行,其支撑的特点首先是具有严格而且明显的接触特性,其次是有预紧力的作用,最后是在外载荷的作用下具有相对滑动的趋势而产生摩擦,因此必须基于其最基本的特征形式。为了提高分析精度,还应尽可能地模拟实际结构。我们采用非线性分析方法,进行实体结构模拟,进行实际模型的解算。

3 球铰支撑的结构设计和工作原理

3.1 球铰支撑的结构设计

目前,各国光学仪器所采用的球铰支撑在地面监测设备、航空、航天上的应用不尽相同,但基本构成原理和主要结构件基本相同,其主要结构件通常由衬套、下压环、球杆、上压环、压盖、拧紧螺母等构成。本文所研究的球铰支撑如图1所示,反射镜及其支撑结构如图2所示。反射镜通光孔径为 $\Phi 580$ mm,球半径2 990 mm,厚度为65 mm,材料为SiC。球杆的球半径19 mm,所选用的殷钢材料与上下压环、衬套相同,线胀系数调配得与反射镜材料相同。三角板选用钛合金,以便降低质量。材料

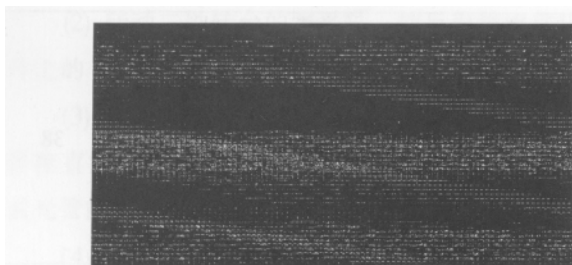


图1 球铰支撑结构简图

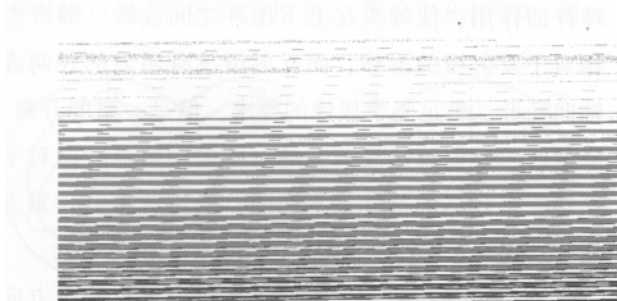


图2 反射镜及其球铰支撑结构示意图

表1 反射镜组件选用主要材料属性表

名称	ρ 10 ⁻⁶ kg/mm ³	E GPa	μ	σ Mpa	α 10 ⁻⁶ /°C
碳化硅	3.12	320	0.18	360	0.55
钛合金	4.4	114	0.29	890	8.90
殷钢	8.3	150	0.25	510	1.0

的属性见表1。衬套与反射镜的镜体胶接在一起,通过压盖上的螺钉将上下压环与球杆的球头压紧,而球杆又通过拧紧螺母与三角板联接,由此实现反射镜的三点定位。反射镜要求在环境温度 ± 20 °C内能够正常工作,即波前差 $<1/10$ 可见光波长(632.8 nm),均方根 $<1/50$ 可见光波长,绕 x 轴的倾斜量 $<5''$ 。

3.2 球铰支撑的工作原理

当3个相同的球铰支撑将反射镜与三角板连接到一起以后,反射镜的6个自由度就会全部约束,而随着工作环境温度的变化,由于三角板和反射镜的材料不同,其线膨胀系数也不相同,三角板的线膨胀系数大于反射镜的线膨胀系数,因而将会导致三角板随温度的升高或降低相对于反射镜产生一定程度的膨胀或收缩。如果没有设置柔性环节,三角板的残余变形将迫使反射镜产生径向和轴向的变形,导致反射镜球面半径发生变化,产生波前畸变。在有球铰设置的情况下,球头将克服与上下压块之间的摩擦,产生微小的滑动,球头与反射镜镜体之间产生微小的相对刚体运动,由此可以有效地减小三角板的热变形对反射镜的影响。

4 球铰支撑下的反射镜组件工程分析

4.1 有限元模型的划分原则

在CAD几何模型的基础上应用MSC.Patran或Hypermesh对几何实体进行有限元模型划分。对于光学结构系统来说,通常所允许的各零部件的变形非常小,而且存在应力集中的地方大多不会对成像造成严重影响,所以不需要模拟非常大的应变。对反射镜分析时,本文尽可能采用六面体单元,当模型十分复杂时,适当地采用楔形单元,以增加过渡的

连续性和协调性。

(1) 对拧紧螺母和压盖螺钉进行一定程度的细化, 可以更加有效地模拟其作为一个可变形体, 并采用一次单元。

(2) 上下压环和球头间的接触面存在着摩擦力、作用力与反作用力, 是整个结构工作的核心部位, 考虑其变形的同时, 还必须考虑接触面间的作用力能够有效地传递, 必须进行网格细化。接触表面间的相互作用包括两个部分: 一是垂直于接触面, 另一个是沿接触面的切向。切向部分包括表面间的相对运动 (称为接触对)。最后模型所构造出的各种表面间的相对运动 (滑动), 就是磨擦剪应力。有限元模型见图 3。

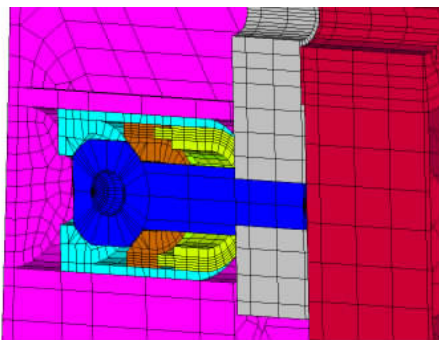


图3 反射镜组件的有限元模型图

4.2 边界条件与分析方法

非线性分析的边界条件的确定与线性分析的边界条件有相似之处, 但也有较为严格的独特之处:

(1) 三角板与外界的接口外力采用固定连接。

(2) 在三点支撑的方案中, 在外力的作用下, 零件将产生弯曲, 会产生相互滑移或倾斜的倾向, 因此, 在摩擦力的定义中采用泛函数的形式, 以增加收敛性和收敛精度。考虑到球头、上下压块的加工条件、手段和工艺的不确定性, 摩擦系数选用 0.15。

(3) 确定分析步骤时, 为增加收敛的速度, 分析可以分 3 步进行, 分别对每一步进行最大变形分析和反射镜的面形精度分析, 再将各步耦合分析, 确定所有载荷作用下的最大变形分析和反射镜的波前差分析。

第一步为施加预紧力: 压盖螺钉预紧力的选取必须相对合理, 太大, 则摩擦力相对变大, 球铰起不到卸载的作用; 太小, 则容易在运载或运输的环境中由于受振动导致反射镜倾斜, 系统也不能正常成像。我们将预紧力从 5 N 增至 2 000 N 分别进行试算, 再由分析结果选取合理的预紧力。

第二步为均匀温度载荷: 分别对反射镜组件整体施加 20 ℃温升载荷和 20 ℃温降载荷。

第三步为重力作用: 沿光轴方向和光轴反方向分别施加 1 倍的重力作用, 计算波前差; 由于反射镜及其支撑结构成轴对称性, 因此竖直方向上只计算单向重力作用即可。

5 分析结论与球铰支撑的试验结果

5.1 分析结论

通过分析得出反射镜随着球铰预紧力变化时, 在温度载荷和重力载荷分别作用下的尺寸稳定性的分析结果 (如表 2 所示)。

表2 反射镜尺寸稳定性分析计算结果

	温度载荷 20 ℃		光轴方向 重力		垂轴方向 重力	
	+	-	+	-	+	-
5 N	11	16	32	34		
100 N	13	18	34	36		
500 N	17	23	35	36		
1 000 N	22	35	36	37	38.5	38
1 500 N	40	42	37	37		
2 000 N	68	69	38	38		

当环境温度变化后, 三角板的变形明显, 由于球杆的作用, 使球头在上下压环之间旋转, 即产生相对于反射镜的滑移, 而反射镜没有明显的径向或轴向变形, 满足光学成像的要求。但是, 温度升高、降低时, 反射镜的波前差绝对值差别明显, 这对于系统要求较高的精度是不利的。当压盖螺钉预紧力逐渐增大时, 这种差别逐步减小, 但波前差增大。

在重力作用下光轴方向上、重力正负两个方向上对反射镜影响的规律与温度影响相似; 垂轴方向

的波前差随压盖螺钉预紧力变化不大,这主要是依靠反射镜自身的刚度保证的。与此同时,压盖螺钉预紧力为5 N时,反射镜绕水平轴的倾斜量最大为0.5 s。

综上分析结果,预紧力选在5~1 500 N时,反射镜的波前差满足光学系统的设计要求,因此,本文所研究的球铰支撑的反射镜在工作环境温度变化和重力场中,能够保证成像的需要。

5.2 球铰支撑的试验结果

球铰支撑是大孔径光学反射镜背部支撑的一种适应能力较强的支撑方式,但由于单个支撑的自由度限制较少,因此在设计和装配上仍然需要相当重视。本文设计了一套真实的球铰支撑结构,利用模拟反射镜和三角板进行了重力作用下的尺寸稳定性测量试验,试验方法如下:

将反射镜组件模拟件固定在二轴转台的水平轴上,调整配重,使反射镜组件模拟件可以转动到任意位置静止。测量位置(1)、(2)[如图4(b)]表示模拟反射镜与三角板的角度变化。

(1) 将3片平面反射镜分别粘贴在模拟反射镜、三角板和背板上,如图4(a)所示;

(2) 转动二轴转台的水平轴,使反射镜组件模拟件上的3片反射镜旋转到如图4(b)所示的(1)位置处;

(3) 在反射镜对面安放T2自准直经纬仪或0.2"自准直测角光管,调整高低和左右方向,使经纬仪或光管能够同时得到3片反射镜清晰的像;

(4) 依次测量出三角板处反射镜的方位偏角 θ_{x1} 和俯仰偏角 θ_{y1} ,同时测出模拟反射镜处反射镜的方位偏角 θ_{x2} 和俯仰偏角 θ_{y2} 。那么, θ_{x1} 与 θ_{x2} 的差

值 $\Delta\theta_x$,以及 θ_{y1} 与 θ_{y2} 的差值 $\Delta\theta_y$ 反映的即是模拟反射镜相对于三角板的方位偏角和俯仰偏角。上述两个分量的合成值 θ_1 即为反射镜在位置(1)处的绝对偏角;

(5) 将二轴转台水平轴旋转180°,使3片反射镜转至位置(2)处,如图4(b)所示。按上述实验步骤(3)、(4)重新测量并计算出位置(2)处反射镜的绝对偏角 θ_2 ;

(6) 计算出位置(1)、(2)处反射镜的绝对偏角差值的绝对值 $\Delta 1$,即为在两个对称位置模拟反射镜与三角板的相对偏角。

同理,可以得出位置(3)、(4)和(5)、(6)处反射镜的相对偏角 $\Delta 2$ 和 $\Delta 3$,如图4(b)所示。

上述3组对称位置处模拟反射镜与三角板之间的相对偏角 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 、 $\Delta 3$ 的算术平均值 Δ ,即为反射镜组件模拟件中模拟反射镜相对于三角板的偏角变化的平均值。试验结果如表3所示,满足倾斜量<5"的设计要求。

表3 偏角测量值

序号	位置	偏角 $\theta_i(^{\circ})$	相对偏角 $\Delta i(^{\circ})$	平均偏角 $\Delta(^{\circ})$
1	(1)	225.22	$ \theta_1-\theta_2 =0.21$	$\Delta=$ $(\Delta 1+\Delta 2+\Delta 3)/3$ $=1.07$
	(2)	225.01		
2	(3)	220.64	$ \theta_3-\theta_4 =1.01$	
	(4)	221.65		
3	(5)	225.69	$ \theta_5-\theta_6 =1.98$	
	(6)	227.67		

6 结束语

大孔径反射镜采用球铰支撑对尺寸稳定性更具有优越性,同时能够更好地适应热环境,为空间相机应用范围的扩展打下了良好的基础。本文通过对非线性接触算法的分析和模拟试验,充分验证了球铰支撑的尺寸稳定性和热稳定性。为了能够支撑口径更大的反射镜,可以在三点球铰支撑的基础上采用多点球铰支撑的方式,其原理是相同的。

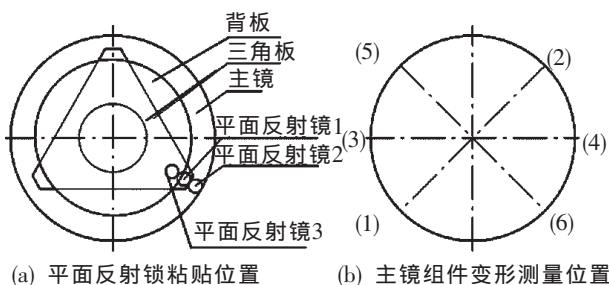


图4 反射镜粘贴位置及组件变形测量位置

参考文献

- [1] 王延风, 卢铿, 宋文荣, 等. 空间相机的结构动力学分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(4): 50-55.
- [2] 吴清文, 陶家生, 宋朝晖. 高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案[J]. 光学 精密工程, 1999, 12(6): 61-65.
- [3] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [4] 吴清文, 卢铿, 王家骥, 等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学 精密工程, 1996, 4(4): 23-28.
- [5] 辛宏伟, 董德义. 长焦距空间遥感支撑结构设计[J]. 光机电信息, 2009, 26(10): 28-33.
- [6] 辛宏伟. 小型轻质长条反射镜挠性支撑方案研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(7): 51-55.
- [7] 樊延超, 柴方茂. 大口径光学遥感器主反射镜支撑设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(5): 16-27.
- [8] Bookbinder J A, Cheimets P, Davis W R, Jr, et al. HIREX: results of the mission concept study[J]. SPIE, 1998, 3442: 22-33.
- [9] Didier C, Bertrand C. Monolithic SiC telescope of the OSIRIS narrow-angle camera for the cometary mission ROSETTA[J]. SPIE, 1999, 3785: 56-65.
- [10] Juranek H J, Kleer G, Doll W. Use of glass ceramic as a structural for a high precision space telescope[J]. SPIE, 1994, 2210: 407-418.
- [11] 付芸, 徐长吉, 丁亚林. 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 550-554.
- [12] 吴清文, 陶家生, 宋朝晖. 高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 61-65.
- [13] 刘梅, 胡企千. 空间太阳望远镜 1 m 主镜支撑结构的研究[J]. 天文研究与技术, 2004, 1(2): 99-106.

作者简介: 董吉洪 (1972-), 男, 汉族, 吉林长春人, 学士, 研究员, 硕士生导师, 1995年于中国科学技术大学获得学士学位, 主要从事光学精密机械、光学遥感技术等领域的研制开发工作。E-mail: dongjihong2002@sohu.com

《发 光 学 报》

——中文核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国 [JP] 知识资源总库·中国科技精品库》。

本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。《发光学报》为双月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年240元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

<http://www.fgxb.org>