

文章编号 1004-924X(2003)06-0555-05

基于有限元分析的长条状主镜支撑结构设计

刘宏伟¹, 张 芹², 丁亚林¹, 吴清文¹, 陈长征¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 北华大学 理学院物理系, 吉林 吉林 132000)

摘要:从满足空间望远镜主镜在复杂工况下综合面形误差要求的角度出发,介绍了大尺寸长条状主镜组件材料和主镜结构的选择确定原则;采用理论分析与有限元计算工具相结合的手段,对主镜支撑结构进行了分析与设计。分析计算表明,若主镜组件采用刚性支撑设计,主镜综合面形误差将远远超出设计要求;而采用柔性支撑设计,当柔性支撑筋板高度取 46 mm、厚度取 1.7 mm 时,主镜组件的动态刚度可达 97.4 Hz;镜面综合面形误差分别达到 63.1 nm、39.3 nm 和 59.6 nm;主镜组件最大变形分别达到 24.6 μm 、21.4 μm 、7.4 μm ,各项指标满足设计要求。平衡稳定性校核表明,当空间相机发射时,柔性支撑筋板不会发生失稳。

关键词:主镜;柔性支撑;有限元分析

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A

Design of strip primary mirror supporting structure based on finite element analysis

LIU Hong-wei¹, ZHANG Qin², DING Ya-lin¹, WU Qing-wen¹, CHEN Chang-zheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Physical Department of Normal School, Beihua University, Jilin 132000, China)

Abstract: The design requirements for the primary mirror sub-assembly of a space camera are: its dynamic stiffness is above 90 Hz; the synthesis face figure error (P-V value) for the primary mirror is less than 632.28 nm, and the maximum deflection is less than 30 μm , when the primary mirror sub-assembly is subject to 1 g gravity and a uniform temperature rise of 4 in X, Y, Z directions. Analysis and calculations show that if the primary mirror sub-assembly is a rigid support, the synthesis face figure error will go far beyond the design requirement; but if it is a flexible support, the error will generally be within the limits specified. The primary mirror sub-assembly must therefore be a flexible support design, and the determination of height and thickness of mirror supporting ribs is the key to a good flexible support design. If flexibility is too high, dynamic stiffness and the maximum deflections of the primary mirror sub-assembly can not satisfy the design requirement; if flexibility is too low, synthesis face figure errors will not meet the design requirements. It is concluded from calculations that when the flexible support rib is 46 mm high, and 1.7 mm thick, the response value of the primary mirror sub-assembly satisfies the design requirements.

Key words: primary mirror; flexible support; finite element analysis

收稿日期:2003-04-16;修订日期:2003-10-15.

1 引言

人类生存的地球正面临着环境、资源、能源及其它全球和区域性的问题。要解决这些问题,要求把地球作为一个系统来认识。理论与实践证明空间遥感是最有效的认识工具。近几年,人们更进一步认识到,以小卫星为平台的遥感技术将成为 21 世纪的发展方向。所谓小卫星^[1]是指质量小于 500 kg 的小型近地轨道卫星。小卫星的技术构成以低成本和实用化为主。星上传感器质量一般小于 250 kg。高分辨率、小型化、轻型化、低功耗是此类传感器设计的重要目标。由于传感器所处的环境条件(如微重力、冲击、振动、温度等)非常复杂,欲采用常规的支撑方法来保证轻型化光学元件高的尺寸稳定性和结构稳定性将十分困难。本文论述的主镜外形为长条状,尺寸为 460 mm × 300 mm,镜面为离轴非球面,设计难度有所增加,因此寻求满足成像质量要求的支撑结构已成为重要的研究课题。

2 支撑结构设计

2.1 主镜组件材料的选择

设计空间光学仪器时,材料的选择主要考虑以下因素:

(1) 光学元件的线胀系数、比热容及导热系数是影响光学元件成像质量的关键因素。导热系数越大,线胀系数和比热容越小,光学元件受到外界热作用时,其热稳定性越好。工程上常选用线胀系数较小,甚至为零的材料作为光学元件的材料。

(2) 材料间的热匹配和热变形补偿能力是解决光学组件适应环境条件,尤其是温度环境的关键。光学元件通过金属结构件支撑、固定,为保证光学元件在较复杂的工况下能正常工作,与光学元件直接接触的支撑结构件的线胀系数应与光学元件的线胀系数匹配^[2]。

综合考虑光学元件的机械性能、对工作环境的适应性、加工工艺性、采购渠道、经济合理性等因素,本文中主镜材料选用微晶玻璃(Zerodur),柔性支撑材料选

表 1 主镜组件的材料属性

Tab. 1 Material properties of the primary mirror sub-assembly (PMS)

材料	密度 ($\times 10^{-6}$ kg/mm ³)	弹性模量 (GPa)	泊松比	线胀系数 ($\times 10^{-6}/$)
Zerodur	2.53	90	0.24	0.1
4J32	8.10	138	0.25	0.3
ZTC4	4.40	112	0.29	8.9

用铁镍合金(4J32),支撑背板材料选用铸钛合金(ZTC4),各材料属性如表 1 所示。

2.2 主镜结构

为了减少空间相机巨大的发射花销,降低主镜在厚度方向的热阻,满足空间相机动态刚度的要求,必须对主镜进行轻量化设计。本文主镜采

用背部加工矩形孔轻量化方式,轻量化率为 62%,其几何、物理参数如表 2 所示。对于大尺寸的反射镜常采用背部支撑方式,支撑点数可以是 3 点、6 点或 9 点。经过对比分析,确定本文主镜采用 3 点背部支撑。

表 2 主镜的几何、物理属性(单位:mm;kg)

Tab. 2 Geometrical and physical properties of the primary mirror (Unit: mm; kg)

长	宽	镜面厚	周边孔壁厚	孔壁厚	镜最薄处	镜最厚处	质量
460	300	8	7	6	77	97	10.8

2.3 柔性支撑与刚性支撑对主镜变形的影响

主镜组件由主镜、柔性支撑和支撑背板 3 部分组成。柔性支撑结构的作用一方面在于隔振,另一方面可以解决很大一部分主镜装配应力,更重要的是当温度变化时,光学元件与其支撑结构

之间的热特性的不匹配可以通过柔性支撑的变形给予补偿^[2]。即当主镜组件受热时,主镜组件将产生热胀,由于支撑背板材料的线胀系数远远大于主镜材料的线胀系数,这将引起支撑的两端产生相对运动,支撑背板对支撑做功。若支撑为刚

性支撑,则这部分功的大部分将转变成镜体的变形能,从而引起镜面局部严重变形,导致成像质量恶化;若支撑为柔性支撑,则柔性支撑将通过自身变形,吸收大部分能量,从而保证镜面的面形质量。表 3 为主镜组件在 4 均匀温升, X、Y、Z 3 个方向分别受 1 g 重力作用,分别采用刚性支撑和柔性支撑(两种支撑的外径均为 56 mm,刚性支

撑采用 56 mm 实心圆柱)时,主镜组件的变形值。由该表可知,采用刚性支撑的主镜组件,其刚体位移虽然较小,但综合面形误差(P-V 值)约为 /3,远远超出了 /10 的设计要求;而采用柔性支撑的主镜组件,虽然刚体位移有一定的变化,但仍满足 30 μm 的设计要求,同时综合面形误差也满足指标要求。由此可见主镜必须采用柔性支撑。

表 3 不同的支撑对主镜组件影响的对比

Tab. 3 Comparison of different supports affecting primary mirror sub-assembly(PMS)

	最大变形(μm)			综合面形误差(P-V)(nm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
刚性支撑	7.7	7.5	7.5	213.3	175.6	174.5
柔性支撑	24.6	21.4	7.4	62.5	39.7	59.1
设计要求	30	30	30	64	64	64

2.4 柔性支撑设计

支撑背板的有限元模型如图 1 所示。主镜支撑方案相当于图示的 A、B、C 三点支撑。

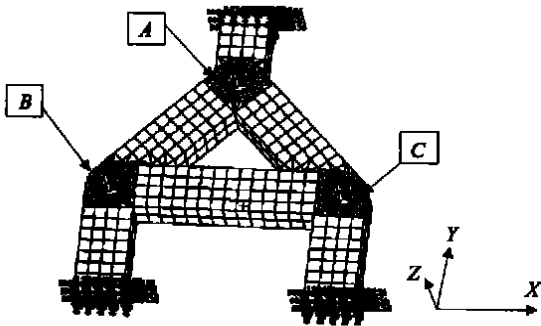


图 1 支撑背板的有限元模型

Fig. 1 FEM model of the support back plate

当支撑背板受热时,它将主要沿着 AB、BC、AC 三条边膨胀伸长。以 B 点柔性支撑为例,它将受到 AB、CB 两个方向的热胀的共同作用。如果在这两个方向都给它以柔性,那么支撑背板带给主镜的变形能的大部分将被柔性支撑吸收。最终,设计的主镜组件的有限元模型如图 2 所示。

综合考虑加工、装配工艺及主镜组件的动态刚度,柔性支撑结构的高度限定在 46 ~ 54 mm,筋板厚度不小于 1 mm。

3 有限元分析

分析时,对支撑背板的三个端部进行 6 自由度全约束,见图 1,工况为 4 均匀温升加上 1 g 重力。支撑筋板取不同参数时,主镜组件的一阶自振频率、变形和镜面综合面形误差(P-V 值)见表 4。

柔性支撑设计的重点在于柔度,也就是柔性支撑筋板的高度与厚度的确定。柔度过大,主镜组件的动态刚度与主镜组件最大变形将不能满足设计要求;柔度过小,镜面综合面形误差(P-V 值)将超出设计要求。由表 4 可知,当柔性支撑筋板高度取 46 mm、厚度取 1.7 mm 时,主镜组件的动态刚度可达到 97.4 Hz;镜面综合面形误差分别达到 63.1 nm、39.3 nm、59.6 nm;主镜组件最大变形分别达到 24.6 μm、21.4 μm、7.4 μm,各项指标均满足设计要求。

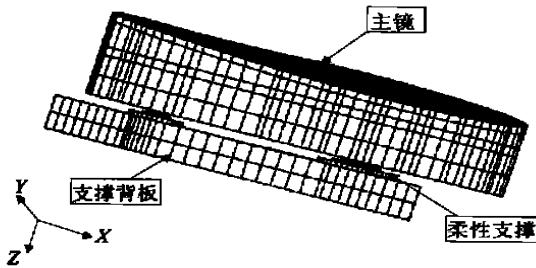


图 2 主镜组件的有限元模型

Fig. 2 FEM model of the primary mirror sub-assembly

表 4 支撑筋板取不同参数时主镜组件的一阶自振频率、变形和镜面综合面形误差 (P-V 值)

Tab. 4 Natural frequency, deflection and P-V of PMS with different reed s parameters

支撑筋板厚度 (mm)	支撑筋板高度 (mm)	f_n (Hz)	最大变形 (μm)			综合面形误差 (P-V)		
			X	Y	Z	X	Y	Z
1.5	46	87.3	29.4	26.8	2.1	54.2	38.3	55.7
	50	76.5	37.7	34.5	2.1	52.5	36.4	56.3
	54	67.6	47.6	43.6	2.1	50.3	34.1	58.2
1.7	46	97.4	24.6	21.4	7.4	63.1	39.3	59.6
	50	85.1	31.5	27.3	7.4	61.7	38.7	56.1
	54	76.3	39.7	34.4	7.4	59.3	36.2	57.4
1.9	46	107.8	20.7	17.6	7.4	90.7	42.6	64.5
	50	94.5	26.5	22.3	7.4	82.2	40.2	60.3
	54	84.2	33.3	27.8	7.4	78.6	38.9	58.2

4 平衡稳定性校核

所谓平衡稳定性系指物体保持自身原有平衡状态的性能。本文中的柔性支撑筋板,高 46 mm、厚 1.7 mm,可视为细长的压杆。他们可能因受压而突然发生弯曲,出现失稳(丧失平衡稳定性),从而导致支撑筋板乃至整个结构破坏或不能正常工作,所以需进行平衡稳定性校核。校核时,把支撑筋板看作一端铰支,一端固定的等直杆。应用等直压杆的临界力公式^[3]:

$$P = 2 EI / (0.7l)^2$$

求得: $P = 7585 \text{ N}$ 。由于主镜采用 3 点支撑,若要使 3 个柔性支撑筋板同时失稳,所需临界力为 $3 \times P = 22755 \text{ N}$ 。而

$$\frac{22755}{M} = 215 \text{ g}$$

g 为重力加速度, M 为主镜质量。

参考文献:

- [1] 姜景山,王文魁,都亨. 空间科学与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
JIANG J SH, WANG W K, DU H. *Science and application of space* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 吴清文,牛晓明. 空间光学仪器温度指标的确定[J]. 光学 精密工程, 1998, 8(增): 211-216
WU Q W, NIU X M. The decision of temperature criteria (TC) of space instrument [J], *Optics and Precision Engineering*, 1998, 8 (增): 211-216. (in Chinese)
- [3] 赵九江,赵祖耀. 材料力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社 1987
ZHAO J J, ZHAO Z Y. *Materials mechanics* [M]. Harbin: Publishing Company of Harbin Institute of Technology, 1987. (in Chinese)
- [4] SZETO K, ROBERTS A, ANRHONY A, et al. Design of a convex and camera mirror support system for altair, the genini-north

既要使 3 个柔性支撑筋板同时失稳,主镜的加速度要达到 215 g。当空间相机发射时,它的最大负载也不会超过 15 g,所以柔性支撑筋板不会发生失稳。

5 结束语

以小卫星为平台的遥感技术将成为 21 世纪的发展方向。这必然要求遥感器小型化、轻型化。一般认为,结构的小型化、轻型化将导致结构整体刚度下降,进而影响遥感器成像质量。如何解决这对矛盾已成为遥感器结构设计人员研究的重要课题。本文正是在这一背景下,对空间相机的支撑结构进行设计、分析、校核,最后得到满足设计要求的结果。

本文基于一定几何尺寸的主镜对支撑结构进行了研究,但最终设计得到的柔性支撑结构形式对其他反射镜也有一定的参考价值。

adaptive optics system[J]. *SPIE*, 2000,4008:942-967.

[5] WISS O, STAVITSKY D. Design of lightweight primary mirror for the TAUVEK telescope[J]. *SPIE*, 1992,1971:227-233.

作者简介:刘宏伟(1971-),男,辽宁锦州人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读硕士研究生,主要研究方向为机械及其自动化;

丁亚林(1964-),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,主要研究方向为光学仪器结构设计;

吴清文(1968-),男,四川简阳人,博士,研究员,主要研究方向为光学精密工程的 CAD 技术应用及塑料注射成型模具的 CAD/CAE 技术。

欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势,其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿,紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点,每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统(MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其所服务的产业提供以下栏目:各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达12 000余份的资深杂志,这意味着每年有数 10 万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇,扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》 请按下列地址联系

联系人:李雪

传 真:(0755)25987390

电 话:(0755)25987370

邮 编:518001

E-mail:omeinfo@126.com

xxtt867@sohu.com