

文章编号: 1003-501X(2010)11-0073-05

基于静定空间桁架原理的空间相机结构设计

杨利伟, 李志来, 鲍 赫

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 现代空间光学传感器向着大口径、长焦距的方向发展。焦距变长意味着主次镜间隔变长, 也就意味着次镜的系统公差更难保证。针对次镜严格的公差要求, 本文提出了一种空间桁架结构的设计理念。根据静定空间桁架原理, 设计了两种结构方案, 采用有限元分析软件, 对两种方案进行了分析, 求得前三阶固有频率、绕 X 轴的倾角和 Y 方向刚体位移。分析结果表明, 设计方案 1 的一阶模态为 78 Hz, 绕 X 轴的倾角为 $2''$, 沿 Y 轴的最大刚体位移是 0.04 mm; 设计方案 2 的一阶模态为 113.7 Hz, 绕 X 轴的倾角为 $1.5''$, 沿 Y 轴的最大刚体位移是 0.022 mm。两种方案都能满足设计要求, 而方案 2 比方案 1 有明显优势。静定空间桁架原理为空间相机结构设计提供了可靠的理论依据。

关键词: 空间相机; 光学系统; 空间桁架结构; 静定; 空间桁架原理

中图分类号: V447.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.11.014

Design for Structure of Space Camera Based on the Theory of Statically Determinate Spatial Frameworks

YANG Li-wei, LI Zhi-lai, BAO He

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

Abstract: The way of development of modern space optical sensors is large aperture and long focus length. Long focus length means the distance between primary and secondary mirror will be longer, and tolerance of secondary mirror means more difficult to guarantee. For the secondary mirror strict tolerances, a design of space truss structure is presented. According to the theory of statically determinate spatial frameworks, two schemes are designed and were analyzed through finite element analysis software. We got the first three inherent frequencies, the angle around the X axis and the rigid body displacement along Y axis. The results show that the first mode of the scheme 1 is 78 Hz, the angle around the X axis is $2''$, and the largest rigid body displacement along the Y axis is 0.04 mm. For scheme 2, the first mode is 113.7 Hz, the angle around the X axis is $1.5''$, and the largest rigid body displacement along the Y axis is 0.022 mm. Two schemes can meet the design requirements, while scheme 2 is more excellent than scheme 1. The theory of statically determinate spatial frameworks provides a reliable theoretical basis for the structural design of space camera.

Key words: space camera; optical system; space frame structure; statically; space frame theory

0 引言

现代空间光学传感器向着大口径、长焦距的方向发展。表 1 列出了近年来国外研制的空间光学传感器的口径和焦距^[1-4]。空间光学传感器采用大口径、长焦距的光学系统, 虽然提高了幅宽和分辨率的指标, 但是也增加了支撑结构的设计难度。焦距变长意味着主次镜间隔变长, 也就意味着次镜的系统公差更难保证。次镜的系统公差包括次镜的面形误差、倾角和刚体位移, 面形误差主要依靠次镜本身的支撑结构来保证,

收稿日期: 2010-08-19; 收到修改稿日期: 2010-09-02

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2009AA7020107)

作者简介: 杨利伟(1980-), 男(汉族), 河南开封人。硕士, 助理研究员, 主要研究工作是空间光学传感器光机结构设计。

E-mail: yanglw2006@yahoo.com.

而倾角和刚体位移主要依靠主次镜间的支撑结构来保证。由于倾角和刚体位移的公差要求十分严格,传统的整体铸造框结构型式已难以满足设计要求。

桁架结构以其变构件受弯曲载荷为拉压载荷形式的设计原理,有效地利用了材料承受拉压载荷的能力远大于承受弯曲载荷的特性,大大提高了相机结构的组合刚度;可采用标准的元件灵活组装,降低了制造加工难度;利用碳纤维复合材料等轻质、近乎零热胀系数的新型材料,可以获得很高的比刚度和很好的力学稳定性与热稳定性。桁架结构以其优良的空间性能,已经成为发展最快的一种空间结构型式,广泛应用于大型及超大型遥感相机的主承力结构、大口径高精度反射镜的支撑结构、空间可展开的反射镜支撑结构等领域。

桁架结构简洁可靠、组装灵活、比刚度高、可设计性强,在遥感相机结构中逐渐占据了重要的地位。随着碳纤维复合材料技术的发展,结合桁架的构型设计可以实现相机结构的消热设计,获得很高的热稳定性。桁架接头采用特殊设计,可以实现桁架装配时的校准调整,以及结构的阻尼减振。因此,桁架结构在遥感相机的镜筒结构、大口径反射镜支撑结构、可展开结构、相机安装结构等方面都逐渐得到了广泛的应用^[5]。一些精密光机电装置中需要使用精密变焦光学镜头。

表 1 近年来国外研制的空间光学遥感器的口径和焦距

Table 1 Diameter and focus length of space remote sensor in recent years

Project type	Diameter /m	Focus length /m
Pleiades HR	0.65	13
SNAP	2	21.66
Herschel	3.5	28.5
JSWT	6.6	131.4

1 设计理念

1.1 静定空间桁架原理

德国著名学者 Foeppel 在他的著作《The Truss in Space》当中,对空间桁架做了详细的描述。他将空间桁架定义为一个由支杆和节点组成的系统,并满足如下条件:在不改变连线长度的条件下,系统组件之间无相对运动。如果一个空间桁架满足式(1),那么这个空间桁架是稳定的、刚性的,并且是没有相对运动的。

$$S = 3K - 6 \quad (1)$$

式中: S 为支杆的数目, K 为节点的数目。这就是静定空间桁架原理^[6]。

图 1 显示了五种基本的理想多面体,假设用支杆代替多面体的每一条边,用节点代替多面体的每一个顶点,那么五种理想多面体就变成了五种空间桁架。桁架结构中 S 与 $3K-6$ 的关系如表 2 所示,通过表 2 可以看出,四面体、八面体和二十面体满足等式(1),属于静定结构;而六面体和十二面体不满足等式(1),不属于静定结构。

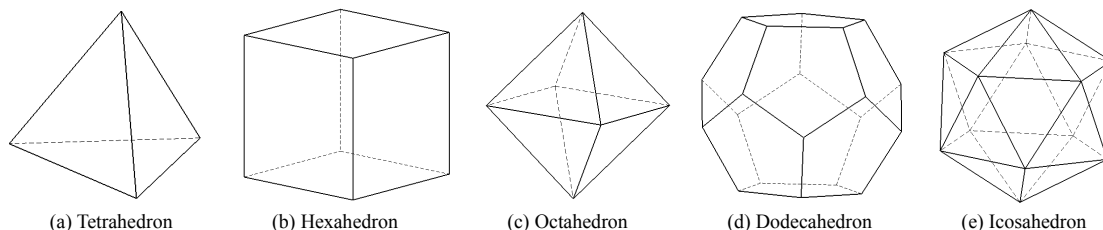


图 1 五种基本的理想多面体

Fig.1 The five basic platonic bodies

1.2 相关设计问题

虽然在结构设计中经常引入超静定结构,但空间结构过度超静定时,常导致制造和装配偏差累积,这可能会引起相当大的残余应力。在最坏的情况下,这还会造成螺栓连接的错位和缝隙。此外,高度超静定

的结构,常因温度改变或存在热应力梯度而存在自应变现象。我们可以在保证结构的稳定性和刚度要求的前提下,通过减少节点-杆结构连接的自由度来解决上述问题。因此,优化设计可以遵循以下步骤:首先按照准则设计使得结构稳定,然后布置子结构使得载荷均匀分布,最后在保证刚性的前提下降低系统的超静定程度^[7]。

本文基于静定空间桁架原理,对空间相机的支撑结构进行了设计与分析,得到了满足要求的设计方案。

表 2 五种空间桁架结构中的 S 与 $3K-6$ 的关系

Truss	S	K	$3K-6$	Relationship between S and $3K-6$
Tetrahedron	6	4	6	$S=3K-6$
Hexahedron	12	8	18	$S<3K-6$
Octahedron	12	6	12	$S=3K-6$
Dodecahedron	30	20	54	$S<3K-6$
Icosahedron	30	12	30	$S=3K-6$

2 设计实例

2.1 设计要求

本文以某同轴两镜光学系统为研究对象进行结构设计,设计输入如下:

- 1) 光学尺寸:主镜直径为 1 000 mm,次镜直径为 300 mm,主镜和次镜的间隔为 2 000 mm。如图 2 所示;
- 2) 动态刚度:次镜支撑结构的一阶模态不低于 70 Hz;
- 3) 次镜系统公差:次镜支撑结构沿 Y 方向的刚体位移不超过 0.05 mm;绕 X 轴倾角不超过 $5''$ 。

2.2 支撑材料的选择

为了保证光学系统严格的公差要求,桁架结构必须具有较高的刚度,良好的尺寸稳定性和热稳定性。碳纤维/环氧复合材料具有高比强度、高比刚度、抗冲击、高阻尼特性、零或负热膨胀系数、尺寸稳定性、抗疲劳等优点,目前越来越多地被空间结构所采用^[8]。本文选用碳纤维作为桁架结构的支杆材料,而次镜基板、接头和球铰则采用密度低、比刚度高、尺寸稳定性好的高体分铝基复合材料。两种材料的属性如表 3 所示。

表 3 支撑材料属性

Material	$\rho/(10^{-9} \text{ t/mm}^3)$	Young's modulus E/MPa	Poisson's ratio μ	Parts
M40J	1.60	145 000	0.30	Support rob
SiC/Al	2.94	213 000	0.23	Substrate of M2, joint and ball joints

2.3 设计方案 1

次镜支撑结构设计方案 1 如图 3 所示,次镜基板为高度轻量化的三角形结构。在主镜基板和次镜基板之间,六根支杆首尾相连,组成一个封闭杆系。桁架杆与上下基板组成的封闭结构抽象为数学模型后,得到了一个不等边的八面体,如图 4 所示。由表 2 可知,该桁架结构满足静定桁架原理。

为了满足结构性能要求,杆件由空心圆杆组成,支杆截面尺寸设计要考虑两个方面要求:既不能产生较大的遮拦面积,又要满足刚度要求。综合各方面考虑,支杆截面尺寸取为内径 32 mm,外径 40 mm。圆杆尺寸大小取决于其刚度,而不是强度。由于实际最大应力只为强度极限的 30%,因此各杆的强度是足够的。次镜基板为中空三角形框架结构,采用碳纤维复合材料。在支杆接头与次镜基板连接处,预埋钛合金

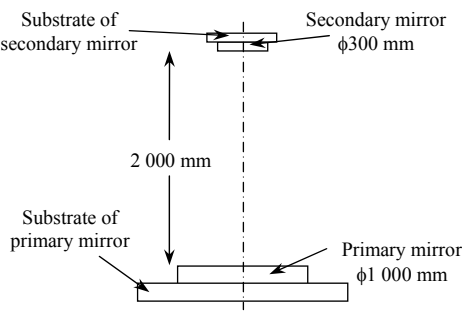


图 2 同轴两镜光学系统关键尺寸
Fig.2 Key dimension in coaxial optical system with two mirrors

件。该方案的结构总重量约 17 kg。

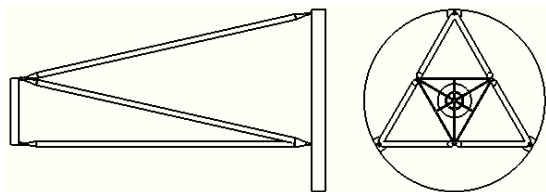


图 3 设计方案 1 三维模型

Fig.3 3D model of design scheme No.1

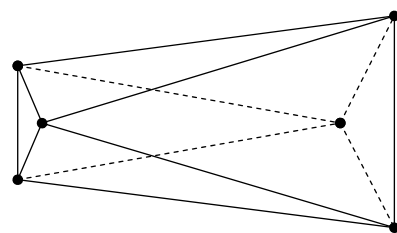


图 4 设计方案 1 的节点桁架拓扑结构

Fig.4 Nodes truss topology structure of design scheme No.1

对设计方案 1 进行了有限元分析。图 5 给出了桁架结构的前三阶约束模态。由图可以看出,一阶模态为 78 Hz,满足设计要求;同时还分析了检测状态下次镜基板的倾角和刚体位移。分析结果表明,次镜基板绕 X 轴的倾角为 $2''$,沿 Y 轴的最大刚体位移是 0.04 mm,满足设计要求。

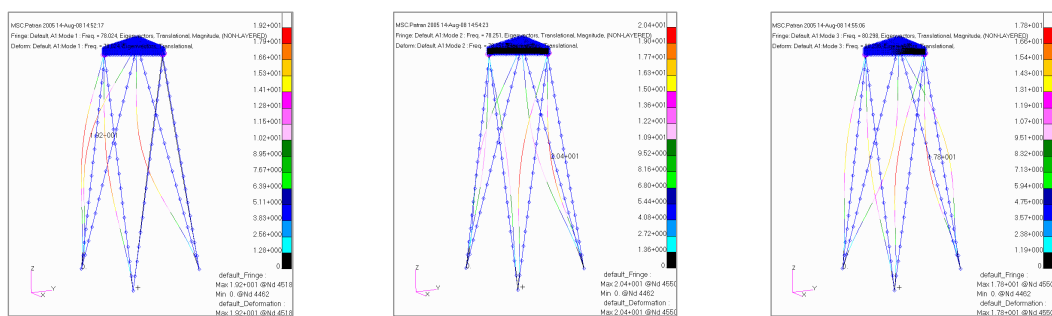


图 5 设计方案 1 前三阶模态分析结果

Fig.5 Former third-order modal analysis results of design scheme No.1

2.4 设计方案 2

次镜支撑结构设计方案 2 如图 6 所示。方案 2 在方案 1 的基础上做了以下修改:在主镜基板和次镜基板之间增加了一层三角形框架,杆系结构由原来的一层,变成了两层。为了便于描述,本文将三角形框架称之为中框架,在次镜基板和中框架之间的杆系,称之为上层杆系,在中框架和主镜基板之间的杆系,称之为下层杆系。上层杆系和下层杆系的结构,和方案 1 的杆系结构相同。由图 6 还可以看出,中框架和上层杆系在主镜基板上的投影重合,这种设计最大限度地减小了遮拦比。桁架杆与上下基板组成的封闭结构抽象为数学模型后,得到了如图 7 所示的拓扑结构。由图可以看出,该空间桁架当中支杆的数目 $S=21$,节点数目 $K=9$,很显然, $S=3K-6$ 。因此这个空间桁架是静定的。

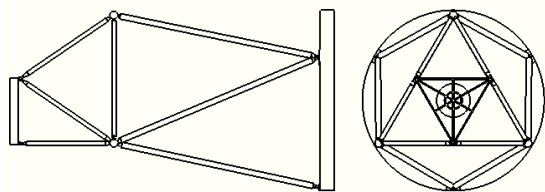


图 6 设计方案 2 三维模型

Fig.6 3D model of design scheme No.2

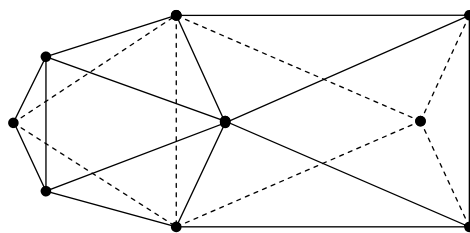


图 7 设计方案 2 的节点桁架拓扑结构

Fig.7 Nodes truss topology structure of design scheme No.2

和方案 1 一样,杆件同样由空心圆杆组成。中框架和上层杆系的支杆,截面尺寸取为内径 24 mm,外径 30 mm。下层杆系的支杆,截面尺寸取为内径 32 mm,外径 40 mm。支杆交汇处采用直径为 56 mm 的球铰。该方案结构总重为 23.1 kg。

对设计方案 2 进行了有限元分析。图 8 给出了桁架结构的前三阶约束模态。由图可以看出,桁架结构的一阶模态为 113.7 Hz,满足设计要求。同时还分析了检测状态下次镜基板的倾角和刚体位移。分析结果表明,次镜基板绕 X 轴的倾角为 $1.5''$,沿 Y 轴的最大刚体位移是 0.022 mm,满足设计要求。

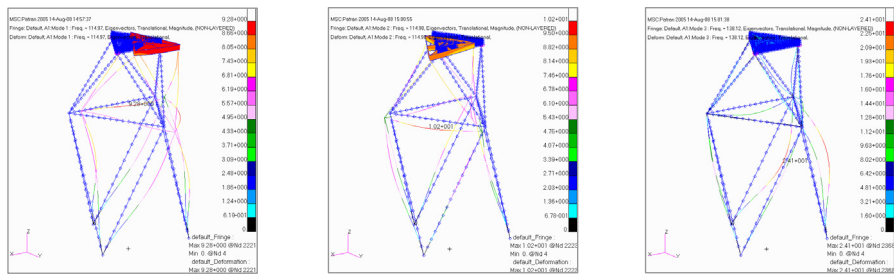


图 8 设计方案 2 前三阶模态分析结果

Fig.8 Former third-order modal analysis results of design scheme No.2

2.5 两种设计方案综述

表 4 对以上两种设计方案的力学结构性能进行了比较,而且还给出了两种方案的遮拦比。两种方案都具有足够高的刚度,并且最大刚体位移和倾角都满足要求,因此都不会影响成像质量。方案 1 具有质量轻、结构简单、易装配等优点,但是遮拦比较大,而且刚度余量较小,实际模型难以满足刚度要求。方案 2 具有结构刚度高、遮拦比小等优点,但是结构复杂,不易装配。综合来看,方案 2 比方案 1 有明显优势,因为方案 2 具有较高的刚度和较小的遮拦比。

表 4 两种设计方案对比

Table 4 Comparison of two schemes

Scheme	Mass /kg			Natural frequency /Hz			Blocking ratio/%
	M40	SiC/Al	mass	1st-order	2nd-order	3rd-order	
No.1	9.4	7.6	17	78	78.2	80.3	16
No.2	11	12.1	23.1	113.7	113.7	138	13

3 结 论

本文根据静定空间桁架原理对同轴两镜光学系统的次镜支撑结构进行了设计,提出了两种设计方案。工程分析结果表明,两种设计方案都能满足成像需要。该原理同样适用于离轴三反光学系统,但由于离轴三反光学系统结构不对称,要想实现静定的支撑结构设计,还需要做进一步的研究。

参考文献:

[1] FAPPANI Denis. Manufacturing & Control of the aspherical mirrors for the telescope of the French satellite Pleiades [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2007, **6687**: 66870T-1-66870T-11.

[2] Toulemont Y. The 3.5 m all SiC Telescope for HERSCHEL [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2004, **5487**: 1119-1128.

[3] Lampton M. SNAP Telescope: an Update [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2004, **5166**: 113-123.

[4] James Contreras, Paul Lightsey. Nominal Performance and Sensitivity of the James Webb Space Telescope: Optical Telescope Element [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2004, **5487**: 842-849.

[5] 范斌, 王艳. 国外长焦距高分辨率遥感相机桁架结构研究 [J]. **航天返回与遥感**, 2008, **29(2)**: 35-41.

FAN Bin, WANG Yan. Research on Truss Structure of Foreign Remote-Sensing Cameras with Long Focal Length and High Resolution [J]. **Spacecraft Recovery & Remote Sensing**, 2008, **29(2)**: 35-41.

[6] Karl-Eugen Kurrer. **The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics** [M]. Berlin, Germany, 2008: 480-481.

[7] Stutzki Christian L. Design concepts for primary mirror support structures of large telescopes for optical and submillimeter astronomy [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2008, **7012**: 70122L-1-70122L-11.

[8] 林再文, 刘永琪, 梁岩, 等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用 [J]. **光学 精密工程**, 2007, **15(8)**: 1181-1185.

LIN Zai-wen, LIU Yong-qi, LIANG Yan, *et al.* Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15(8)**: 1181-1185.