

文章编号: 1672-8785(2012)09-0030-05

某空间可见光相机的机身桁架结构设计

张 凯 何 欣 崔永鹏

(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: 作为空间可见光相机的主要承载结构, 机身桁架结构对于保证机身的力学性能至关重要。为了保证空间相机机身的结构刚度和稳定性, 针对机身桁架结构设计进行了研究。研究了桁架的基本结构, 分析了支杆力学性能的影响因素, 探讨了支杆长度和角度对该机身桁架力学性能的影响。分析了支杆数量、支撑位置和分布形式对机身力学性能的影响, 并分析了“ Δ ”型和“X”型桁架结构的特点。通过选择合理的支杆数量和分布形式, 保证了机身桁架的力学性能。然后在设计分析的基础上进行了力学试验, 验证了机身的力学性能。试验结果表明, 该桁架结构的设计能够获得较好的力学性能, 满足机身结构的设计要求。

关键词: 空间相机; 力学特性; 桁架结构; 工程分析

中图分类号: TH745; V19 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.09.006

Design of Truss Structure for a Space Optical Camera

ZHANG Kai, HE Xin, CUI Yong-peng

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

Abstract: As the main supporting structure for a space visible camera, the truss is critical for ensuring the mechanical performance of the camera body. To improve the stiffness and stability of the space camera body, the design of a truss structure is studied. The basic structure of a truss, the influence factors of mechanical property of poles and the influence of pole length and angle on the camera body are presented. The features of both Δ shape and X shape truss structures are analyzed. By selecting reasonable quantity and distribution form for poles, the mechanical properties of the camera truss are ensured. Then, the mechanical properties of the camera body are verified. The result shows that this design can ensure the truss structure to obtain good mechanical properties. So, it meets the design requirements of the camera body.

Key words: space camera; mechanical property; truss structure; engineering analysis

0 引言

空间相机是一种伴随着人造卫星而发展起来的精密仪器。其中, 机身结构是空间相机的重要组成部分, 也是保证成像质量的关键部件。它可以精确保证各光学元件的相对位置, 形成光

学成像系统, 承受外界冲击。所以机身结构需要具有足够高的动、静态结构刚度和稳定性。

当今国际上在空间相机结构设计中普遍采用的是桁架结构, 如哈勃望远镜和 KH-12 卫星的相机等。桁架结构设计的优点是比刚度高、重量轻、通用性好和灵活易拆装, 因而适合轻量

收稿日期: 2012-06-22

作者简介: 张凯 (1981-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事机械结构设计、机械制造和系统装调等方面的研究。E-mail: zhangkaihai@sohu.com

化程度要求较高的大中型空间光学系统。

1 桁架结构形式的确定

桁架结构主要依靠支杆作为承力结构。对于本文所涉及的可见光相机, 其机身结构的外形尺寸为 $1348 \text{ mm} \times 1160 \text{ mm} \times 812 \text{ mm}$, 计划采用桁架结构设计。

桁架设计首先需要确定是采用单层桁架还是采用多层桁架。这主要是根据桁架结构的长宽比和实际情况来决定的。设长 (L) 宽 (B) 比为 $K^{[1]}$:

$$K = \frac{L}{B} \quad (1)$$

当 $K < 1.4$ 时, 一般采用单层桁架结构。

本文讨论的空间相机机身桁架结构的长宽比为 $K = 1.16 (< 1.4)$ 。另外, 相机的主要质量和光学元件都集中在前后两端, 中间没有需要承载的零部件。所以结合实际情况, 相机机身采用单层桁架结构形式。

2 支杆布设形式的设计

桁架结构的设计原则是, 整个机身桁架结构必须是静定的。

支杆数量的选择标准是, 在满足相机机身结构力学性能要求的基础上, 尽量选择支杆数量较少的桁架结构, 以减轻重量。

各个支杆需要均匀受力, 并在平面或空间内组成结构稳定的三角形单元, 以形成稳定的支撑, 从而获得较高的力学性能。支杆只有相对于机身的对称面成对布设、对称分布, 才能使机身具有较好的稳定性。

在满足桁架结构设计原则的基础上, 按照常用的“ Δ ”型(支杆无交叉)和“X”型(支杆空间交叉)这两种情况对支杆进行设计。为了使两根支杆平均受力, 通常采用等腰三角形结构设计。支杆可被视为简支梁, 其受力可分解为支杆轴向的拉压载荷和支杆径向的弯曲载荷。由于相机支杆较长, 承载拉压载荷的能力明显高于承载弯曲载荷的能力, 所以应将载荷尽量分解到支杆轴向上, 将所受弯矩减至最小。

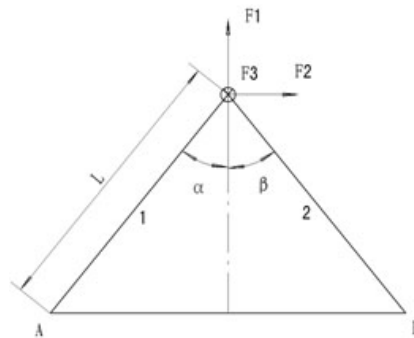


图1 “ Δ ”型桁架结构

图1所示为“ Δ ”型桁架结构。当桁架结构受拉伸的载荷 $F_1=2T$ 时, A点所受弯矩为 $M_{A1}=TL\sin\alpha^{[2]}$; 当受面内弯曲载荷 $F_2=2T$ 时, A点所受弯矩为 $M_{A2}=TL\cos\alpha$; 当受垂直所在平面的弯曲载荷 $F_3=2T$ 时, A点所受弯矩为 $M_{A3}=TL$ 。所以, α 角越小, 桁架结构的抗拉压载荷能力越好; α 角越大, 桁架结构的抗弯曲载荷能力越好。若要兼顾拉压和弯曲刚度, 则要求

$$M_{A1} + M_{A2} = TL(\sin\alpha + \cos\alpha) = TL\sqrt{1 + \sin 2\alpha} \quad (2)$$

取最小值, 即 $\alpha = 45^\circ$ 。此时, 支杆在面内的综合刚度最好, 可以最大程度地将所受力转换为拉压载荷。

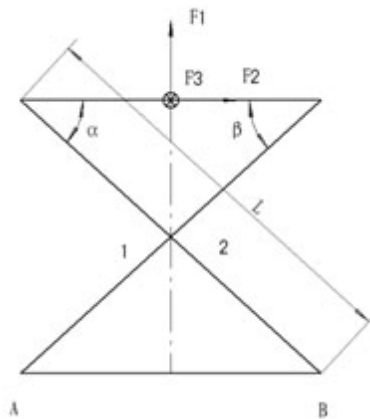


图2 “X”型桁架结构

图2所示为“X”型桁架结构。当桁架结构受拉伸载荷 F_1 时, A点所受弯矩为 $M_{A1}=TL\cos\alpha$; 当受弯曲载荷 F_2 时, A点所受弯矩为 $M_{A2}=TL\sin\alpha$; 当受垂直所在平面的弯

曲载荷 F_3 时, A 点所受弯矩为 $M_{A3}=TL$ 。所以, α 角越小, 桁架结构的抗弯曲载荷能力越好; α 角越大, 桁架结构的抗拉压载荷能力越好。若要兼顾拉压和弯曲刚度, 则要求

$$M_{A1} + M_{A2} = TL\sqrt{1 + \sin 2\alpha} \quad (3)$$

取最小值, 此时 $\alpha = 45^\circ$ 。

综上所述, 当桁架支杆角度取 45° 时, 各向力学性能比较平均, 面内综合刚度最好。由 $\sqrt{1 + \sin 2\alpha}$ 的函数曲线可知, 在 $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ 的区间内, 函数值变化较慢; 在 $30^\circ \leq \alpha$ 或 $\alpha \geq 60^\circ$ 的区间内, 函数值变化较快。可以通过改变连接角度来改变力学性能, 但只有在与 45° 偏离较大时才会收到明显效果。如果支杆长度变化较小, 那么它对力学性能的影响并不明显^[3]。

两种桁架结构对角度的敏感程度相同。在同一桁架结构中, “ Δ ”型桁架的支杆比“X”型桁架的支杆短, 受力状态更好; 但是“X”型

桁架比“ Δ ”型桁架具有更大的连接角度。所以在设计中需要经过认真的计算和比对, 然后再根据实际情况作出决定。该机身桁架结构中“ Δ ”型桁架的支杆角度和长度分别为 79° 和 1420 mm, 而“X”型桁架的支杆参数分别为 60° 和 1510 mm。两者的角度差别较大, 杆长差别较小。面内力学性能属“X”型桁架较好。

在桁架结构设计中, 不仅要考虑支杆面内受力, 而且还要考虑多组支杆组合后的力学性能^[4]。本文设计了几种典型的结构形式, 其中支杆数量分别选择 6 根和 8 根^[5], 如图 3、图 4 和图 5 所示。用有限元法计算它们各自的静态力学性能(拉力、弯曲和扭转)和动态力学性能(谐振频率), 计算数据详见表 1。然后在设计基础上局部添加支杆, 加强机身结构, 最后进行数据比较。

图 3 所示为 6 根支杆的设计形式。在 6 根支杆的情况下, 机身无法形成封闭结构, 此时有一

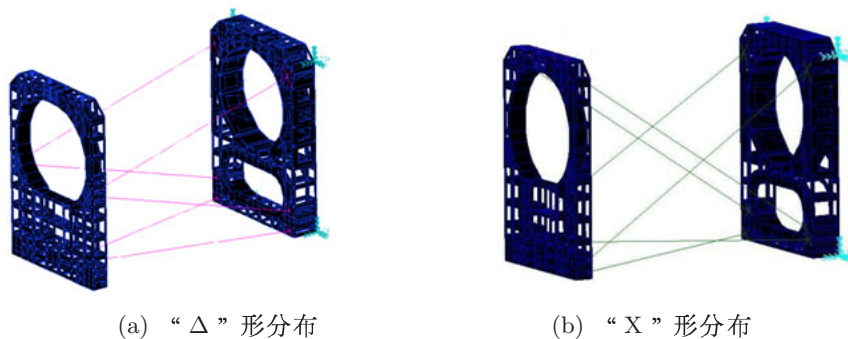


图 3 6 根支杆分布形式

表 1 桁架结构的力学性能参数

编号	频率 (Hz)			Z 向均布拉力 (1T) 变形量	X 向弯矩 (1T) 变形量	Y 向弯矩 (1T) 变形量	X 向扭矩 (1T) 变形量	Y 向扭矩 (1T) 变形量	Z 向扭矩 (1T) 变形量
	1 阶	2 阶	3 阶						
a	40	85	102	0.029	0.555	0.099	0.071	0.108	0.557
b	42	82	126	0.033	1.550	0.136	0.125	0.172	1.270
c	68	84	109	0.009	0.153	0.099	0.070	0.039	0.154
d	74	100	150	0.026	0.125	0.069	0.093	0.056	0.064
e	65	86	91	0.018	0.168	0.133	0.107	0.062	0.244
f	55	80	84	0.009	0.243	0.075	0.071	0.040	0.245
g	50	84	94	0.009	0.308	0.100	0.081	0.041	0.221
h	67	96	140	0.028	0.135	0.099	0.118	0.061	0.189
i	67	83	106	0.009	0.152	0.098	0.071	0.038	0.152
j	85	105	148	0.024	0.098	0.062	0.071	0.043	0.060
k	66	82	104	0.007	0.148	0.098	0.031	0.024	0.146
l	86	105	147	0.023	0.088	0.058	0.063	0.034	0.057

个面内无支杆支撑。

由表 1 可知, 在 6 根支杆的情况下, 两种支杆分布形式在谐振频率上没有明显差别。“ Δ ”型结构在静态力学性能上略优于“X”型桁架结构。由此可见, 动、静态力学性能会受到支杆空间分布、杆长和角度的多重影响, 导致两种设计的力学性能比较接近。

当桁架结构设计采用 8 根支杆时, 机身就可以被设计成封闭结构, 支杆的分布形式也比较多样化。例如, 可以将其全部设计成“ Δ ”桁架结构, 类似于 Serrurier 桁架^[6]; 或者将其全部设计成“X”型桁架结构; 也可以根据实际情况将其设计成两者混合的结构形式。图 4 所示为具体的设计形式。

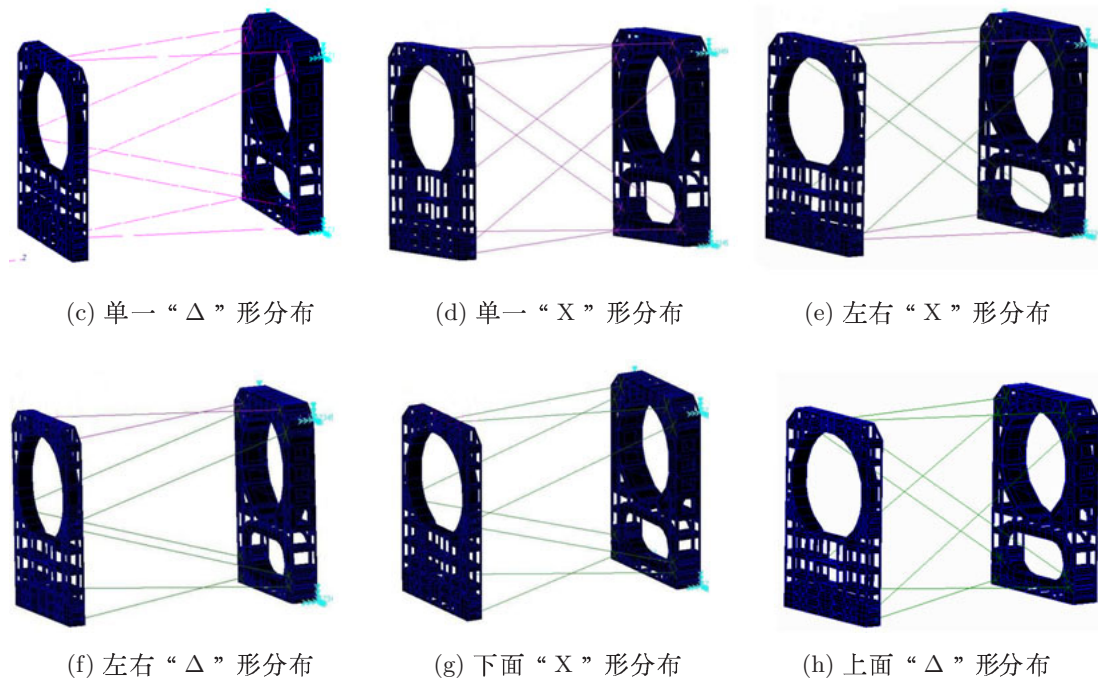


图 4 8 根支杆的分布形式

由表 1 中的力学性能数据可知, 与 6 根支杆的结构形式相比, 8 根支杆的结构形式在动、静态力学性能上普遍有明显提高。由此可见, 结构是否封闭对该相机机身的力学性能有着巨大的影响。

在 8 根支杆的情况下, “X”型桁架结构的前 3 阶谐振频率都明显高于“ Δ ”型桁架结构和混合型桁架结构。因此, 结构是否封闭对“X”型结构动态力学性能的影响比“ Δ ”型结构的更为严重。结构封闭后, “X”型结构平面力学性能较好的优点便可得以体现。

由表 1 中的数据对比可知, 混合型桁架结构的谐振频率大都低于单一的“ Δ ”型和“X”型桁架结构。其中有一个明显的趋势是, 在桁架结

构封闭的情况下, 增加“X”型结构的使用量可提升动态力学性能, 如图 4(h) 数据所示。

在静态力学性能上, 混合型结构各有优缺点, 但其综合数据并没有明显优于单一型桁架结构。

因此, 在选择 8 根支杆的情况下, 无论是在谐振频率上还是在静力变形上, 单一的桁架结构要优于其余的结构形式。而单一的“X”型桁架结构又是较好的一种选择。

图 5 所示为在 8 根支杆基础上的加强形式^[7], 包括 10 根和 12 根支杆两种。对比数据后可知, 单纯地进行局部区域的加强工作, 效果并不明显, 仅使原来没有支杆约束的地方的变形量稍有下降^[8]。所以机身桁架选用 8 根支杆, 并采用单一的“X”型桁架设计, 如图 4(d) 所示。

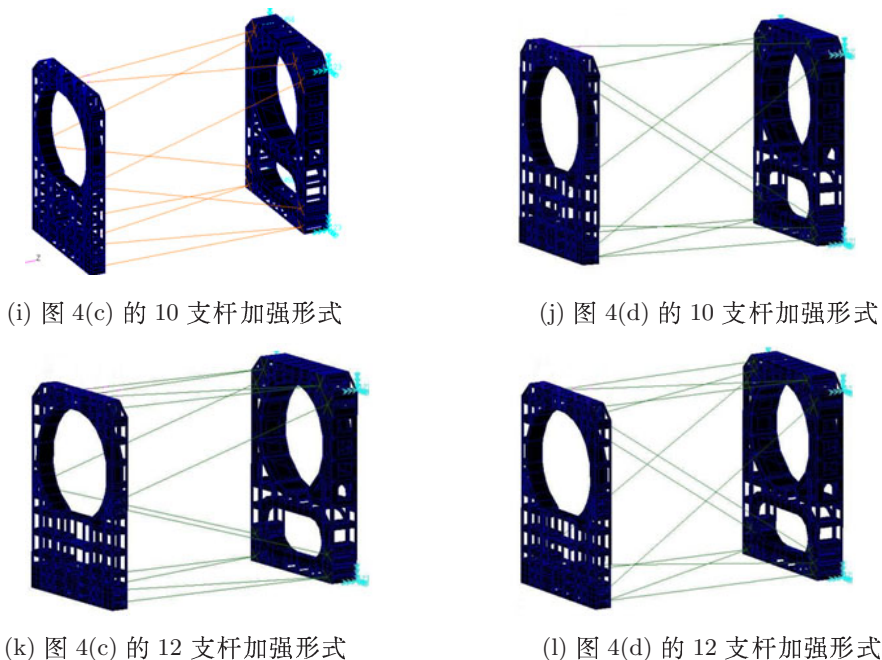


图 5 8 根支杆的加强形式

3 力学环境试验

为了验证机身结构的真实动态力学性能是否与设计结果一致,需要对装配完成后的机身结构进行振动试验。振动试验可以检测机身的固有频率^[9]。表 2 列出了振动试验条件。

表 2 随机振动条件

频率 (Hz)	重力加速度 ^{2g}	重力加速度 ^{4g}
20 ~ 100	3 dB/oct	3 dB/oct
100 ~ 600	0.005 g ² /Hz	0.005 g ² /Hz
600 ~ 2000	-9 dB/oct	-9 dB/oct
RMS	2 grms	4 grms
duration	300	120

试验结果如下:机身的一阶谐振频率为 78 Hz,试验前后的频率特性未发生变化。试验值与计算值吻合得较好,机身结构满足设计要求。

4 总结

本文对空间相机机身桁架结构的设计进行了初步研究。在静力学性能上,支杆角度因素可使“Δ”型桁架的抗拉压能力变得更好,使“X”型桁架的抗弯曲能力变得更好。在动力学性能上,“X”型结构桁架的谐振频率较高。空间相机在实际使用中所受的静态力学载荷相对于动态过载来说一般较小。在保证结构强度的基础上,提升动态力学性能是机身结构设计的关键。

因此,将该相机机身设计成了单层桁架结构。通过选择 8 根支杆和采用单一的“X”型桁架结构,保证了结构封闭,获得了最佳的动、静态力学性能。通过计算分析和试验验证可知,该机身桁架设计合理,能够满足设计和使用要求。

参考文献

- [1] 闻邦椿. 机械设计手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [2] 孙桓. 机械原理 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2011.
- [3] 卢秉恒. 机械制造技术基础 [M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [4] 李士猛, 张蓉竹. 支撑面积对薄镜面形影响的研究 [J]. 红外与激光工程, 2009, 1(38): 82-86.
- [5] Pressel P. Generic Telescope Truss [J]. SPIE, 1991, 1532: 50-56.
- [6] Keith D, Vukobratovich D. Design of a Modified Ser-rufier Truss for an Optical Inteferometer, Design of Optical Instruments [C]. SPIE, 1992, 1690: 357-365.
- [7] 李吴, 胡云昌, 曹宏铎. 桁架结构布局优化现状与主要问题 [J]. 青岛大学学报, 2002, 17(3): 49-52.
- [8] 马恒, 刘栋栋, 李维平, 等. 基于遗传算法的桁架结构布局优化设计 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2005, 25(1): 67-71.
- [9] 董冰, 俞信, 张晓芳, 等. 分块式空间望远镜的光机热集成分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 2(38): 326-329.