

文章编号: 1672-8785(2013)09-0024-05

桁架接头对遥感相机桁架的影响

田富湘 何 欣 赵海平

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学二部, 吉林 长春 130033)

摘 要: 桁架结构在大中型遥感相机中已被广泛应用。理想的桁架接头为铰接接头, 但在实际工程应用中人们却经常采用刚性连接接头。为比较采用两种接头的桁架的整体刚度及支杆材料利用率, 首先对桁架中常用的两脚架结构进行了分析。然后, 以锯齿形四角架桁架为例, 从理论上计算出了两种不同接头的桁架的基频及受前框自重时支杆的最大应力。结果表明, 两种接头的桁架的整体刚度几乎一样, 但采用铰接接头的桁架比采用刚性连接接头的桁架材料利用率高, 支杆可节省重量约 21.87%。最后, 用 Nastran 软件进行了有限元分析。结果证明, 该理论计算结果是正确的, 两种计算结果的差别小于 1.12%。

关键词: 空间相机; 桁架接头; 两脚架; 刚性连接; 材料利用率

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.09.05

Influence of Different Joints on Truss for Remote Sensing Camera

TIAN Fu-xiang, HE Xin, ZHAO Hai-ping

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

Abstract: Truss structures are widely used in large- and medium-sized remote sensing cameras. The ideal joint for a truss is the hinged one. However, a rigid joint is often used in practical applications. To compare the stiffness and strut material utilization of the trusses using different joints, the bipod structures used commonly in trusses are analyzed firstly. Then, by taking a Serrurier truss as an example, the fundamental frequency of the trusses using two different joints and the maximum stress yielded by the weight of their front frames are calculated in theory. The result shows that the trusses using two different joints have nearly a similar integral stiffness. But in material utilization, the truss using a hinged joint is better than that using a rigid joint. Its strut can save about 21.87% in weight. Finally, the finite element analysis is carried out by using the Nastran software. The analysis result shows that the theoretical calculation is correct and the difference between the two calculation results is less than 1.12%.

Key words: space camera; truss joint; bipod; rigid joint; material utilization

0 引言

在大中型空间遥感相机中, 桁架结构应用得非常广泛。桁架结构的刚度好, 空间利用率

高, 具有传统整体箱式铸造框架无法比拟的优势^[1-3]。桁架结构采用变受弯曲载荷为受拉压载荷的优化设计原理, 充分应用了材料受拉压载荷时材料利用率高的特性。理想桁架的节点应

收稿日期: 2013-07-22

作者简介: 田富湘(1983-), 男, 福建大田人, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间光学仪器结构设计方面的研究。

E-mail: tianfuxiang@foxmail.com

该是铰接点, 它不会传递弯矩和剪力。但在空间遥感相机的实际应用中, 桁架接头很难做成理想的球铰连接接头, 有些桁架甚至直接采用螺栓等刚性连接接头, 杆件不可避免地要承受弯矩和剪力, 无法完全发挥桁架结构杆件材料利用率高的特点^[4]。本文将分别对采用理想铰接接头和刚性连接接头的桁架进行理论分析计算, 研究这两种不同桁架接头对桁架整体刚度以及支杆材料利用率的影响。最后, 采用 Nastran 软件进行有限元分析, 验证计算结果的正确性。

1 理论计算

理想的桁架接头应该是球铰, 因为其杆件只受轴向拉压应力。而在实际使用中, 桁架接头往往采用螺接或焊接等刚性连接方式, 杆件不仅承受轴向力, 还承受弯矩和剪力—次内力。由于弯矩的存在, 杆件截面所受应力大小不均匀, 如图 1(b) 所示。杆件受弯曲载荷时, 上层和下层应力最大, 而中间层应力为零, 截面应力不能同时达到最大, 材料未得到充分利用^[5]。

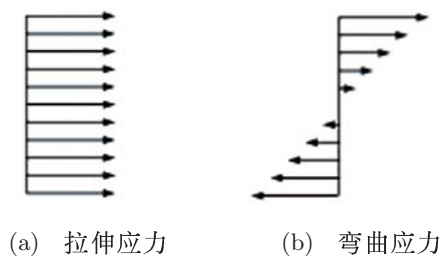


图 1 杆件截面应力分布图

本文以图 2 所示的锯齿形四角架结构为例, 比较两种桁架接头对桁架整体刚度及支杆材料利用率的影响。桁架的整体刚度主要通过桁架基频来表征。支杆材料利用率可通过两种桁架受相同载荷时支杆所受的最大应力进行比较。支杆所受最大应力越小, 材料利用率就越高。

图 2 所示的桁架结构由前框、后框、8 根支杆及 16 个支杆接头组成。其中, 8 根支杆完全相同, 组成了 4 组相同的两脚架结构。两脚架结构在桁架中的应用非常普遍。为便于对桁架结构进行系统分析, 首先对两脚架结构进行研究。

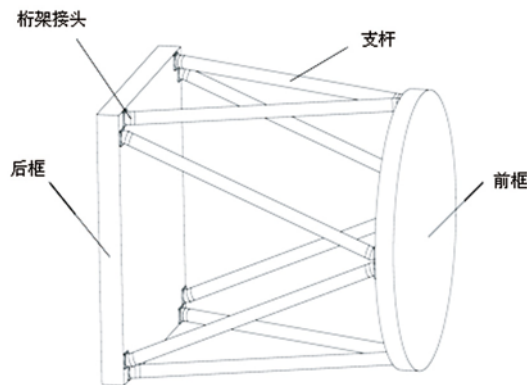


图 2 锯齿形四角架桁架

1.1 两脚架结构

两脚架结构的简化图如图 3 所示, 构成两脚架的两支杆完全相同。图 3(a) 为理想铰接的两脚架。铰接两脚架的支点 o 有 4 个自由度, 只能承受由两杆组成的平面内的力。用在 x 轴和 y 轴的分量 F_x 和 F_y 表示平面内的力。由于两杆均为二力杆, 支点 o 受力 F_x 和 F_y 的位移分别为

$$\delta_{F_x} = \frac{l}{2EA \cos^2 \alpha} F_x \quad (1)$$

$$\delta_{F_y} = \frac{l}{2EA \sin^2 \alpha} F_y \quad (2)$$

式中, l 为支杆的长度, E 为支杆材料的弹性模量, A 为支杆的横截面积。

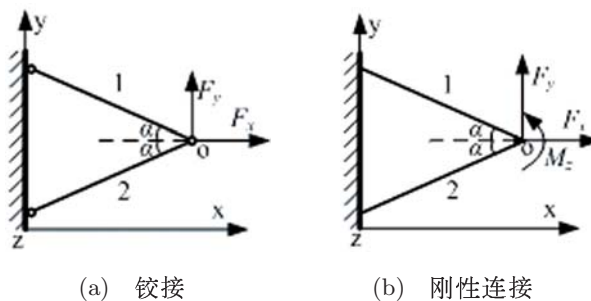


图 3 两脚架结构

图 3(b) 为刚性连接的两脚架。刚性连接的两脚架的支点 o 理论上没有自由度, 可承受任意方向的力和力矩。但在两杆组成的面内刚度远大于面外的刚度, 因此, 主要考虑面内载荷, 即沿 x 轴和 y 轴的力及绕 z 轴的力矩。由于支点 o 与被支物体是刚性连接, 因此, 支点 o 在受载产生位移的同时也产生转角。刚性连接两脚架为超静定结构, 因此可通过静力平衡方程、变形协

调方程及物理方程来求解支点 o 分别受力 F_x 、 F_y 及力矩 M_z 的位移及转角:

$$\delta_{F_x} = \frac{l^3}{24EI \sin^2 \alpha + 2EAl^2 \cos^2 \alpha} F_x \quad (3)$$

$$\theta_{F_x} = 0 \quad (4)$$

$$\delta_{F_y} = \frac{l^3}{6EI \cos^2 \alpha + 2EAl^2 \sin^2 \alpha} F_y \quad (5)$$

$$\theta_{F_y} = \frac{3l^2 \cos \alpha}{12EI \cos^2 \alpha + 4EAl^2 \sin^2 \alpha} F_y \quad (6)$$

$$\delta_{M_z} = \frac{3l^2 \cos \alpha}{12EI \cos^2 \alpha + 4EAl^2 \sin^2 \alpha} M_z \quad (7)$$

$$\theta_{M_z} = \frac{12Il \cos^2 \alpha + Al^3 \sin^2 \alpha}{24EI^2 \cos^2 \alpha + 8EAl^2 \sin^2 \alpha} M_z \quad (8)$$

式中, I 为支杆横截面的惯性矩。

通过分别计算两种两脚架受各向单位载荷时支点 o 的位移, 可比较两种两脚架的刚度。

支杆为空心圆管, 外径 $D_1=60$ mm, 内径 $D_2=54$ mm。支杆材料的弹性模量 $E=220$ GPa, 支杆的长度 $l=1489.30$ mm, $\alpha=22.0872^\circ$ 。计算结果见表 1。从表 1 可知, 两种两脚架在 x 方向的刚度基本没有区别, 而在 y 方向受力时, 刚性连接两脚架会附带产生转角。另外, 刚性连接两脚架具有较强的抗绕 z 轴弯曲的刚度。

铰接两脚架与刚性连接两脚架受载时, 支杆所受的内力不同。铰接两脚架支杆只受轴向力, 而刚性连接两脚架支杆在受轴向力的同时还受剪力和弯矩。当各方向分别受单位载荷时, 两种两脚架支杆在 o 点处所受的内力情况见表 2。其中, F_{1a} 和 F_{2a} 分别为支杆 1 和支杆 2 所受轴向力, F_{1r} 和 F_{2r} 分别为支杆 1 和支杆 2 所受剪切力, M_1 和 M_2 分别为支杆 1 和支杆 2 所受弯矩。

表 1 铰接与刚性连接两脚架刚度比较

载荷	铰接	刚性连接	
	位移 / (10^{-9} m)	位移 / (10^{-9} m)	转角 / (10^{-9} rad)
$F_x=1$ N	7.3381	7.3355	0
$F_y=1$ N	44.562	44.414	41.450
$M_z=1$ N·m	∞	41.450	3906.5

表 2 铰接与刚性连接两脚架支杆的内力比较

载荷	铰接		刚性连接					
	杆 1	杆 2	杆 1		杆 2			
	F_{1a} (10^{-4} N)	F_{2a} (10^{-4} N)	F_{1a} (10^{-4} N)	F_{1r} (10^{-4} N)	M_1 (10^{-4} N·m)	F_{2a} (10^{-4} N)	F_{2r} (10^{-4} N)	M_2 (10^{-4} N·m)
$F_x=1$ N	5396	5396	5394	-4.8229	-3.5913	5394	4.8229	3.5913
$F_y=1$ N	-13297	13297	-13253	-18	0	13253	-18	0
$M_z=1$ N·m	0	0	-12369	5019	5000	12369	5019	5000

1.2 桁架基频及最大应力比较

图 4 为锯齿形四角架结构的简图。后框固定在基座上, 前框的质量 $M=64.16$ kg, 支杆为空心圆管, 几何尺寸及材料参数与上节相同。前后框距离 $L=1380$ mm, $H=560$ mm, 即角度 α 与上节相同。为便于分析计算, 忽略了支杆的质量, 将

前后框看作刚体, 4 组两脚架的支点与前框的质心共面。图 4 结构的基频振型一般为前框沿 y 轴或 z 轴的平动^[6,7]。单自由度弹簧-质量系统的基频计算公式为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\delta}} \quad (9)$$

式中, g 为重力加速度, δ 为质量块 m 受自重的位移。根据式 (8), 图 4 所示的桁架结构的基频可通过前框沿 y 轴的自重位移近似计算。

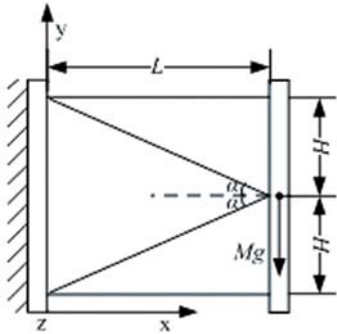


图 4 锯齿形四角架桁架结构

对于铰接桁架, 前框的自重完全由侧面的两组两脚架承载, 上下两组两脚架完全不受载。根据式 (2), 可得前框沿 y 轴的自重位移:

$$\delta_h = -\frac{l}{4EA \sin^2 \alpha} Mg \quad (10)$$

将式 (9) 代入式 (8) 可得铰接桁架的基频为 133.1126 Hz。另外, 参照表 2 可得受前框自重时支杆的最大应力为 0.779 MPa。

对于刚性连接桁架, 前框自重主要由侧面的两组两脚架承载。由于两侧的两组两脚架在承载前框的自重时, 不仅产生 y 向位移, 还会产生绕 z 轴的转角, 从而使上下两组两脚架承受拉压载荷。刚性连接桁架承受前框自重时的受力如图 5 所示。根据静力平衡方程可得:

$$2F_y - mg = 0 \quad (11)$$

$$2FH - 2M_z = 0 \quad (12)$$

根据变形协调方程得:

$$\theta_F = \frac{\delta_F}{H} = \theta_{F_y} - \theta_{M_z} \quad (13)$$

式中, δ_F 为上下两脚架受力 F 产生的位移, θ_{F_y} 为侧面两脚架受力 F_y 产生的转角, θ_{M_z} 为侧面两脚架受力矩 M_z 产生的转角。由表 1 可知, $\delta_F = 7.3355 \times 10^{-9} F$, $\theta_{F_y} = 4.145 \times 10^{-8} F_y$, $\theta_{M_z} = 3.9065 \times 10^{-6} M_z$ 。将它们代入式 (12), 并结合式 (10) 与式 (11), 便可得 $F=5.9274 \text{ N}$, $F_y = 314.7048 \text{ N}$, $M_z = 3.3194 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。参照表 1 可得, 前框沿 y 轴方向的自重位移为 $1.384 \times 10^{-5} \text{ m}$, 再将其代入式 (8) 得基频为 133.9962 Hz。参照表 2 可得, 受前框自重时支杆最大应力为 0.997 MP, 发生在侧面两脚架的支杆上。

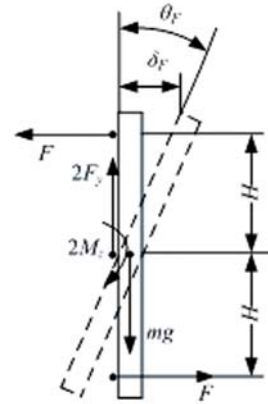


图 5 刚性连接桁架前框受力分析

表 3 列出了铰接桁架与刚性连接桁架的基频及受前框自重时支杆所受的最大应力。由表 3 可知, 铰接桁架与刚性连接桁架的基频差别不大。受前框自重时, 铰接桁架的支杆最大应力是刚性连接桁架的 78.13%。换言之, 与刚性连接相比, 采用铰接桁架的支杆可减重 21.87%。因此, 在工程应用中, 应尽量采用接近理想铰链的接头, 如球铰接头和十字铰链柔性接头等, 以减少弯矩和剪力的传递。

表 3 理论计算值与 Nastran 计算值比较

	铰接桁架		刚性连接桁架	
	模态 (Hz)	支杆最大应力 (MP)	模态 (Hz)	支杆最大应力 (MP)
理论计算值	133.1126	0.7790	133.9962	0.9970
Nastran 计算值	132.67	0.7789	134.6600	0.9860

2 计算结果的验证

为验证以上计算结果的正确性,采用 Nastran 有限元分析软件对图 4 中的桁架结构进行了分析计算。有限元分析的模型如图 6 所示,前后框均为刚体,忽略支杆质量。对于铰接桁架支杆,通过杆单元与前后框实体单元的直接连接来模拟铰接。对于刚性连接桁架支杆,则通过梁单元与前后框架的多点约束来模拟刚性连接。有限元分析计算结果见表 3。由表 3 可知,理论计算结果与有限元分析计算结果非常接近,误差小于 1.12%。这证明以上理论计算结果是正确的。

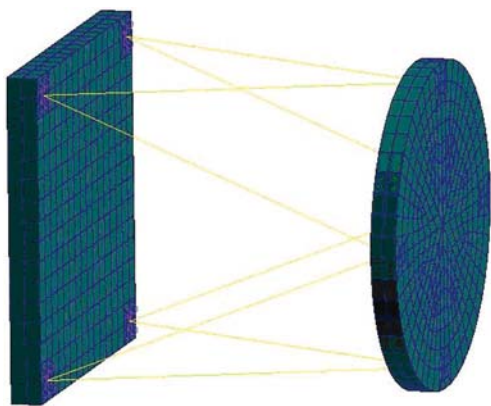


图 6 桁架有限元分析模型

3 总结

从两脚架结构的研究出发,通过理论分析计算研究了铰接桁架和刚性连接桁架的整体刚

度及支杆材料利用率。理论计算结果表明,采用铰接接头或刚性连接接头对桁架基频基本没影响。但受前框自重时采用铰接接头的桁架支杆的最大应力仅为采用刚性连接接头的 78.13%,材料利用率高,也就是说,采用铰接接头支杆可减重 21.87%。因此,在工程应用中,应尽量采用接近理想铰链的桁架接头。最后,通过 Nastran 有限元分析验证了理论计算结果的正确性,理论计算结果与有限元分析结果的差别小于 1.12%。

参考文献

- [1] Yoder J P R, Yoder P, Vukobratovich D, et al. Optomechanical Systems Design [M]. Washington: SPIE Press, 2005: 717-724.
- [2] Gueguen F, Bettet A, Toulemont Y, et al. Spot Series Camera Improvement for the HRG, very High Resolution Instrument of SPOT 5[C]. *EUROPTO conference on design and engineering of optical systems*, 1999: 301-312.
- [3] 田富湘, 何欣, 张凯. 空间相机桁架杆接头结构研究 [J]. *光机电信息*, 2011, 28 (8): 51-55.
- [4] 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*, 2009, 29(2): 35-41.
- [5] 刘浩. 钢管桁架次应力分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007: 7-8.
- [6] 李畅, 何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计优化 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2405-2409.
- [7] 张雷, 贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 603-608.
- [8] (上接第 8 页)
- [16] Sutton G. Non-Line-of-Sight Launch System [J]. *Technology Today*, 2005, 2: 8.
- [17] Dereniak E L, Boreman G D. Infrared Detectors and Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [18] Rogalski A. HgCdTe Photodiodes Versus Quantum Well Infrared Photoconductors for Long Wavelength Focal Plane Arrays [J]. *Opto-Electronics Review*, 1998, 6(4): 279-294.
- [19] 王忆锋. 红外图像的灰度直方图分析统计研究 [J]. *红外*, 2009, 30(4): 14-16.
- [20] Henini M, Razeghi M. Handbook of Infrared Detection Technologies [M]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2002.
- [21] Breniere X, Tribolet P. Uniting IR Detectors for Tactical and Space Applications: a Continuous Cycle for Reliability [C]. *SPIE*, 2009, 7298: 72981V.