

文章编号 1004-924X(2007)08-1164-06

空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验

陈长征^{1,2}, 赵玲玲³, 刘磊¹, 任建岳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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 鲁东大学, 山东 烟台 264025)

摘要: 为保证空间遥感器成功发射, 采用有限元法计算了主要承受动力学载荷支撑桁架的模态特性, 用锤击法对支撑桁架实物进行了模态测试。对计算结果与试验结果的模态频率进行了对比, 用视觉比较、模态置信准则等方法进行了模态振型相关性分析。结果表明, 桁架结构的一阶频率为 154 Hz, 满足了一阶频率 > 140 Hz 的设计要求; 桁架结构的有限元模型平均频率计算误差 < 10%, 局部存在与试验结果相关性 < 0.5 的振型, 需要进一步的修正, 才能满足后续工程的应用要求。

关键词: 空间遥感器; 桁架; 模态计算; 模态试验; 相关性分析

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A

Modal calculation and test of truss in space remote sensor

CHEN Chang-zheng^{1,2}, ZHAO Ling-ling³, LIU Lei¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Ludong University, Yantai 264205, China*)

Abstract: In order to launch the space remote sensor successfully, the modal characteristic of a truss for enduring the dynamic load was calculated by Finite Element Method(FEM), and the modal test was done by the hammer beat method. The calculated and tested frequency result was compared, and the visual comparing method and the Modal Assurance Criterion(MAC) were employed in the relativity analysis of the modal shape. Experimental result shows that the first-order order frequency of the truss is 154 Hz, which satisfies the design requirement above 140 Hz, and the calculated error of the FEM is less than 10%. There are some shape relativity less than 0.5 in partly, so the FEM model needs to be modified for the following engineering use.

Key words: space remote sensor; truss; modal analysis; experiment ; correlation analysis

1 引言

空间传感器在对地观察、太空探测等领域具有重要的科学和军事意义^[1],人们对传感器的应用需求越来越广泛,对其性能的要求也越来越高。空间传感器向高分辨、轻型、宽覆盖、多谱段等方向的发展,也对其设计提出了更高的要求。主支撑桁架作为空间传感器的重要部件,其设计的优化程度直接关系到传感器的设计质量,是传感器设计中的关键。主支撑桁架起支撑各个光学元件并保证其稳定性的作用,在设计中,除了对其强度有要求外,对其动静态刚度要求也非常高。传感器在发射过程中承受着冲击、振动、噪声等多种动载荷作用,桁架结构是承受动力学载荷的主要环节之一,其动态特性将直接影响传感器其它部件的振动环境^[2-3]。模态特征能够从质量和刚度特性上反映桁架结构的力学性能,因此模态优化是桁架结构设计的重要目标之一。模态特性可以通过有限元模态计算和实际结构的模态测试两种方法获取。在空间传感器的设计过程中,通常利用有限元仿真方法进行模态计算并据此进行优化设计;试件生产完成后,用模态测试的方法来获取桁架的模态特性,并用测试结果对有限元的数学模型进行修正。主支撑桁架的有限元模型除了用于设计阶段的计算和优化外,还要应用到后续的动响应计算,环境试验和在轨飞行状态预示计算等,其准确性将影响整个空间传感器研制的工程质量和周期,因此通过试验的方法对其进行修正非常必要。本文利用锤击法对某空间传感器的主支撑桁架进行了模态测试,测试结果显示某空间传感器的主桁架结构具有足够的动态刚度。通过对测试结果和有限元计算结果进行相关性分析,验证了主支撑桁架的有限元模型。结果显示有限元模型建立基本准确,但存在局部误差,需要进一步修正。

2 有限元分析

在空间传感器的设计阶段,通常用有限元分析的方法进行结构特性的预示和优化设计。为考核空间传感器经受发射过程的动载荷能力,需要进行传感器动响应计算,桁架结构是动响应考核

的主要对象之一,而且其动响应的特性往往直接影响整机的动响应特性。因此,桁架结构的动态特性在传感器的设计中显得特别重要,而模态能从根本上反映结构的动态特性,同时模态计算也是更为深入的动力学分析的起点^[4]。因此,在设计阶段,常常对桁架结构进行模态计算和以模态为目标的优化设计。本文研究的桁架结构优化设计后其有限元模型如图1所示,整个模型由六面体和楔型五面体的体单元和三角形和四边形的壳单元构成,整个模型共划分13 534个节点,桁架

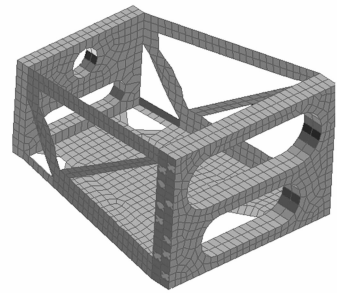


图1 桁架有限元模型图

Fig. 1 FEM of the truss

表1 桁架结构计算/试验模态频率比较

Tab. 1 Comparing frequency of test with calculation

阶次	计算频率	试验频率	频率差(%)	阻尼(%)
1	167	154	8.4	0.046
2	177	164	7.9	0.057
3	180	167	7.8	0.035
4	233	216	7.9	0.285
5	242	223	8.5	0.371
6	277	245	13.1	0.028
7	291	260	11.9	0.074
8	307	277	10.8	0.560

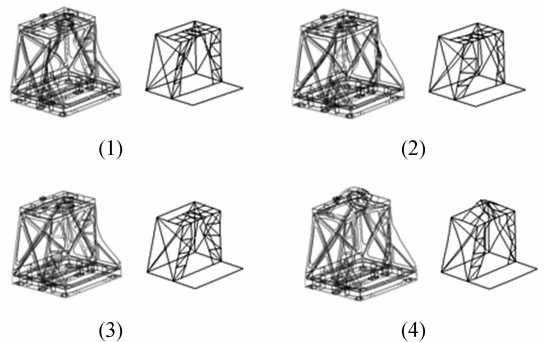


图2 桁架结构计算和试验模态一阶到四阶振型对照图

Fig. 2 Calculation mode shapes and test mode shapes

材料参数为弹性模量 $E=100$ GPa, 密度 $\rho=3\ 000$ kg/m³, 泊松比 $\mu=0.25$ 。用有限元分析软件 MSC/NASTRAN 进行自由模态计算, 得到桁架前八阶模态。其模态频率和振型结果分别见表 1 和图 2。

3 模态测试

对加工后的桁架结构进行模态测试, 为了进行测试结果与有限元分析结果的相关性分析, 建立了桁架的测试模型如图 3 所示, 模型中的节点为实际结构的力锤敲击点和加速度传感器的测试点。由于桁架的结构复杂, 模态振型也比较复杂, 为了能够明确识别在试验频段内的所有模态振型特征, 在模态测试中按照桁架轮廓选取了 109 个测点, 图 3 模态测试模型相应由 109 个节点构成。试验部件处于自由支承状态, 采用单点顺次敲击, 三点同时拾振的方法。三个拾振点分别是后面 (X 轴正方向为前面)、侧面、上面三个面的中间节点, 方向为各点所处面的法线方向。对于各个平面内部的点, 只敲击其法线方向, 平面边缘的点尽量敲击两个方向甚至三个方向。共得到 459 个频率响应函数。

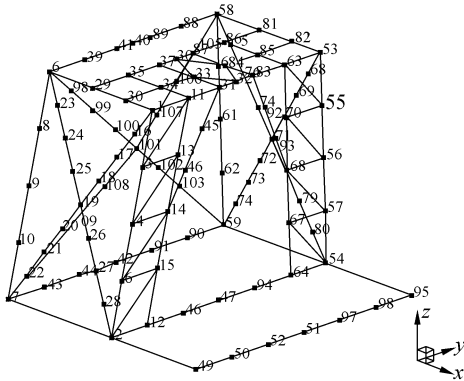


图 3 桁架模态试验几何节点布置图

Fig. 3 Test model of the truss

对于试验得到的频响函数采用多参考 (Polyreference) 的方法来识别结构的模态参数。多参考技术实际上是处理单个或者多个参考点的所有响应函数的曲线拟合方法。这种技术是利用多行多列的传递函数矩阵获取模态参数的整体最小二乘估计。此算法具有高度的数字稳定性, 特别适合宽频带的分析^[7]。参数识别的结果见表 1 和图 2。

从测试结果可以看出, 整个桁架的第一阶模态频率为 154 Hz, 相对于运载的一阶频率 (18 Hz) 来说, 具有足够的动态刚度。

4 计算/试验模态相关性

模态计算和模态试验两者之间的关系如图 4 所示。分析计算/试验两个模型在一定准则上的相符程度的工作叫作模态相关性分析。通过相关性的比较可以定性或者定量地获取两个模型的差异, 如果差异比较大, 则需要进行有限元模型的修正, 从而形成一个可以反复的闭环过程。如果差异在允许范围之内, 则认为有限元模型是准确的, 可以用来进行其它的一些设计评估, 例如进行响应分析或者结构优化等^[5-6]。

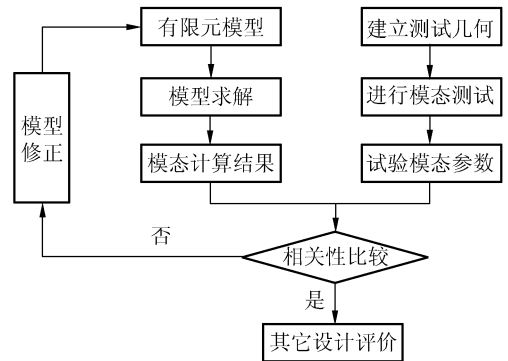


图 4 模态试验和计算两者关系图

Fig. 4 Relation between the test and the calculation

计算/试验模态相关分析是用来判断二者模态模型在一定准则上相符的程度。目前, 依据判断准则的不同, 从总体上可以分为频率相关分析、振型相关分析、频响函数相关分析。振型相关分析又可以分为视觉比较、模态相关准则、正交性检查、坐标模态置信准则等方法。下面将对各种相关分析做一些讨论和计算。

4.1 频率相关性

固有频率通常是动力分析的最基本参数, 而且比模态向量更容易准确测量。测量频率 ω_T 与计算频率 ω_A 之间的相关性常以百分数差来表示, 如表 1 所示。其中, 阻尼值为试验模态参数识别得到的结构阻尼百分比结果。

4.2 振型相关性

脱离了振型, 单纯的比较固有频率往往没有

意义,对于复杂的结构或者存在密集模态的情况下更是如此。实践中,同时考虑频率和振型的相关性分析应用比较多。这主要包括下列的相关分析方法:视觉比较、模态置信准则(MAC)、正交性检验、坐标模态置信准则等等。

4.2.1 振型的视觉比较

通过同时观测计算模态振型和试验模态振型,可以定性地了解两种方法结果的差别。在此比较的基础上可将相应的计算模态和实验模态进行配对。

图 2 为通过计算和试验两种方法得到的前四阶振型对照图。

由图可以判断出,这两种方法得到的一到四阶振型结果基本是一致的。

4.2.2 模态置信准则

振型的相关性分析也可以通过计算模态置信准则(Modal Assurance Criteria,MAC)矩阵来得到。MAC 值是一对计算振型和试验振型的相关系数,其计算原理如下:

$$MAC_{ij} = \frac{(\boldsymbol{\varphi}_{iA}^T \boldsymbol{\varphi}_{jT})^2}{(\boldsymbol{\varphi}_{iA}^T \boldsymbol{\varphi}_{iA})(\boldsymbol{\varphi}_{jT}^T \boldsymbol{\varphi}_{jT})}$$

其中 $\boldsymbol{\varphi}_{iA}$ 、 $\boldsymbol{\varphi}_{jT}$ 分别是计算得到的第 i 阶振型向量和试验得到的第 j 阶振型向量。

MAC 矩阵中的各元素可以表示计算模态与试验模态的相关程度,MAC 矩阵的非对角元素越小,各阶模态的区别就越明显,对角线元素越接近 1,试验模态和计算模态的符合程度就越高。

本文得到的前八阶模态振型的 MAC 结果如表 2 所示。

表 2 计算与试验一阶到八阶模态的 MAC 值对照表
Tab. 2 Comparing MAC values of test with calculation

计算值 试验值	167	177	180	233	242	277	291	307
154	0.899	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
164	0.113	0.830	0.148	0.004	0.023	0.001	0.001	0.137
167	0.025	0.151	0.821	0.001	0.111	0.000	0.002	0.024
216	0.008	0.000	0.011	0.884	0.000	0.028	0.001	0.002
223	0.000	0.000	0.003	0.009	0.365	0.005	0.457	0.000
245	1.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.931	0.000	0.005
260	0.000	0.001	0.000	0.000	0.081	0.007	0.909	0.000
277	0.016	0.000	0.076	0.002	0.024	0.002	0.167	0.460

根据此对照表可以判断:前八阶振型中,除了第五阶和第八阶的计算和试验的模态振型结果相关性比较低之外,其它各阶的相关程度都比较高。

4.2.3 正交性检查

正交检验通常指的是模态向量对质量矩阵的正交性。两组振型之间的交叉正交性定义为:

$$[XOR]([\boldsymbol{\Phi}_A], [\boldsymbol{\Phi}_T]) = [\boldsymbol{\Phi}_A]^T [\mathbf{M}_A] [\boldsymbol{\Phi}_T]$$

其中: $\boldsymbol{\Phi}_A$ 为计算仿真得到的模态振型矢量结果, $\boldsymbol{\Phi}_T$ 为试验得到的模态振型。 \mathbf{M}_A 为计算模型根据试验测点缩减后的质量矩阵。当试验模态向量与分析模态向量对分析质量矩阵正交时,对角元素将全为 1,而非对角元素的值为 0。

由于分析模型与试验模型的自由度不一致,需要做质量矩阵的缩减^[8],这将带来不同的缩减

技术,将导致不同的正交性误差问题,实践中应用比较少。

本文利用 Guyan 缩减的方法,最后得到了正交检验矩阵,其结果与表 2 相似,在此不再展示。

4.2.4 同位模态置信准则

同位模态置信准则(Coordinate Modal Assurance Criteria,COMAC),是基于每单个自由度来发现两组模态振型的相关性。

传统上,MAC 为对两组振型进行相关的首选工具。它可以给出振型的相关性矩阵。但是 MAC 计算没有给出差的相关性的结果主要是由结构上那些部位的振型差别引起的。MOMAC 用来探索识别结构中引起的低相关程度的坐标位置。

COMAC 可以用下面的方法得到:

$$\text{COMAC}_p = \frac{\sum_{r=1}^L |\Psi_{pr} \phi_{pr}|^2}{\sum_{r=1}^L \Psi_{pr} \Psi_{pr}^* \sum_{r=1}^L \phi_{pr} \phi_{pr}^*}$$

其中: L : 互相配对的模态振型矢量数目

Ψ_{pr} : 自由度 p 点, 第 r 配对的试验得到的模态振型系数

ϕ_{pr} : 自由度 p 点, 第 r 配对的计算得到的模态振型系数

COMAC 的数值界于 0~1 之间, 相关程度较差的自由度处的坐标模态置信因子接近 1。

通过计算, 本文得到的 (1-COMAC) 结果如图 5 实线所示, 虚线部分为原始几何模型。此计算结果可以为将来的模型修正提供参考。

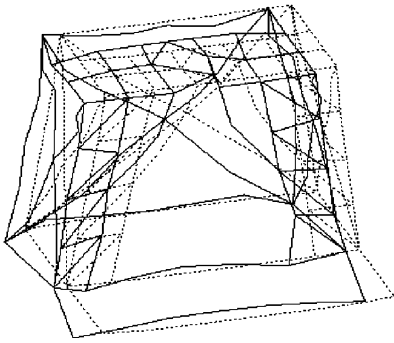


图 5 (1-COMAC) 结果

Fig. 5 (1-COMAC) result

4.3 频响函数对比

通过计算模态可以得到计算模型的固有频率, 振型等信息, 如果能够对各阶模态赋予合适的阻尼信息, 那么就可以得到模型中任意两点之间的频率响应函数。将此频率响应函数和试验测得的两点之间的频率响应函数进行比较, 就可以很好地评价有限元模型的质量。

本文得到了计算模态模型频响函数的拟合结

果, 其中阻尼比取自各阶的试验模态结果 (见表 1)。与原始测试结果的对比如图 6 所示。

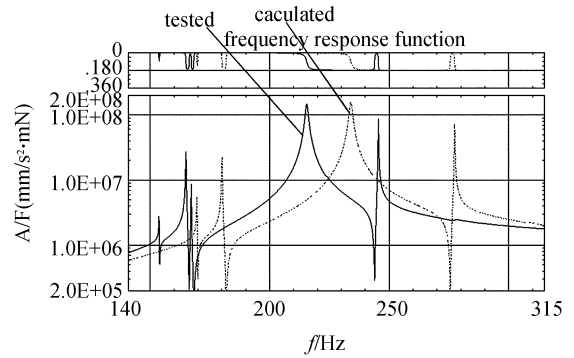


图 6 频响函数比较图

Fig. 6 Test frequency response functions compared with calculation

5 结 论

本文对某遥感器支撑桁架分别进行了有限元计算和试验模态测试, 并对计算结果和测试结果进行了相关性分析, 对有限元模型的建模准确性进行了判断。

从计算结果 (一阶频率 167 Hz) 和测试结果 (一阶频率 154 Hz) 可以看出, 该支撑桁架满足本文研究桁架结构一阶频率 140 Hz 的指标要求, 也说明桁架结构具有较高的动态刚度。通过对计算结果和模态测试结果的对比分析可以看出, 模态计算比试验得到的固有频率要高, 模态振型第五阶和第八阶相关性稍微差一点, 而其它的振型相关性比较明显。通过模型的振型可以看出第五阶和第八阶模态的主要响应部位均发生在小框架一端, 因此可以判断, 有限元模型与实际桁架的差别主要在小框架部分。此计算模型需要用来做产品优化设计并装配到遥感器整体模型上, 必须还要对其进行修正, 使两者的相关性达到规定的标准要求。修改的参数可以包括尺寸, 材料特性等, 有必要对此进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘磊, 高明辉. 空间大口径望远镜可展开式反射镜单元镜支撑技术[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(3): 127-134.
LIU L, GAO M H. Support technique of deployable unit mirror in space large aperture telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 120-122. (in Chinese)
- [2] 陈志平, 陈志远, 杨世模. 空间太阳望远镜主桁架的模态分析与试验[J]. 光电工程, 2004, 31(12): 1-7.

- CHEN ZH P, CHEN ZH Y, YANG SH M. Modal analysis and experiment on the main truss of space solar telescope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004,31(12):1-7. (in Chinese)
- [3] 杨近松. 空间相机桁架结构模态相关性分析[J]. 计算机仿真, 2006,23(1):274-276.
YANG J S. Modal correlation analysis of frame structure of a space camera[J]. *Computer Simulation*, 2006,23(1):274-276. (in Chinese)
- [4] 李淑娴, 吴一辉, 宣明. 电磁式微流体动态混合器的动力学数值模拟[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):127-134.
LI SH X, WU Y H, XUAN M. Dynamic numerical simulation of a electromagnetic microfluidic active mixer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):127-134. (in Chinese)
- [5] 张令弥. 动态有限元模型修正技术及其在航空航天结构中的应用[J]. 强度与环境, 1994(2):10-17.
ZHANG L M. The technique of dynamic FE model modification and application for the aviation and space flight structures[J]. *Structure and Environment Engineering*, 1994(2):10-17. (in Chinese)
- [6] 杨斌, 刘景全, 陈迪, 等. 非接触压电微马达的仿真与实验研究[J]. 光学精密工程, 2005,13(2):165-170.
YANG B, LIU J Q, CHEN D, *et al.*. Simulation and experimental study of non-contact piezoelectric micromotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2):165-170. (in Chinese)
- [7] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
LI D B, LU Q H. *Analysis of Experiments in Engineering Vibration* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [8] KAMMER D C. Development of test-analysis Models for Large Space Structures Using Substructure Representations[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1991,28(2):244-250.

作者简介: 陈长征(1976—), 男, 山东人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 研究方向为光学成像系统光机热集成仿真。E-mail: may328@163.com