

应用锤击法的大型复合材料桁架结构段自由振动分析*

黄春芳¹, 王 鹏², 何明昌¹, 肖加余¹, 鞠 苏¹, 江大志¹

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军理工大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏南京 210007)

摘要: 复合材料桁架结构以其轻质和优异的力学性能应用于大型航天航空飞行器结构, 其承载能力和振动特性是决定其应用效果的关键因素。本文考察了大型碳纤维/环氧复合材料方形截面桁架结构段的自由振动特性。采用锤击法实验测试得到了复合材料桁架结构段自由振动的模态和频率, 并与有限元数值模拟结果进行对比分析, 论证了锤击法测试振动特性在复合材料桁架结构上应用的可行性和准确性。

关键词: 碳纤维复合材料; 桁架; 振动模态; 自由频率; 锤击法

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2018)01-037-05

Analysis of natural vibration characteristics of large composite truss structure based on hammering method

HUANG Chunfang¹, WANG Peng², HE Mingchang¹, XIAO Jiayu¹, JU Su¹, JIANG Dazhi¹

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Continuous fiber reinforced polymer matrix composite trusses are widely used in aerospace and aircraft structures due to their excellent mechanical properties and relatively light weight. The vibration characteristics of the structures are the key factors for the application of composite truss. The natural vibration characteristics of composite truss were studied by using the hammering method. Comparative analysis of the truss structure was carried out by using the finite element simulation. Results show that the structural vibration modes and vibration frequency are consistent with the experimental results, which verified the feasibility and accuracy of the hammer excitation on the vibration characteristics of composite truss.

Key words: continuous fiber reinforced polymer matrix composites; truss; vibration modes; natural frequency; hammering method

桁架结构由若干杆件及连接杆件的接头以一定构型组合而成, 凭借其空间可伸展、易组装、整体性好、设计灵活等优点, 在各类航天器中得到了广泛的应用。桁架结构往往是高次超静定结构, 具有多向受力的优势, 其刚度和整体性较好, 能有效地承受集中荷载、非对称荷载以及各种动力荷载。同时, 桁架的杆件和接头容易实现标准化的设计, 并制造成标准件, 便于贮存、运输和安装。因而桁架结构成为航天器结构技术研究的热点, 并且在各类航天器中得到了广泛的应用^[1-3]。

国外对复合材料桁架结构的研究及应用开展较早, 现已广泛应用于包括卫星、飞船、空间站、太空望远镜在内的各类航天结构。例如: 哈

勃太空望远镜光学系统支撑结构就采用了桁架结构。该桁架结构采用石墨纤维/环氧复合材料制作, 有4个环向梁, 分3层, 每层16根斜杆^[4]。MSX航天器光学仪器支撑结构也采用了桁架结构, 其主要设计指标为: 轴向一阶频率35 Hz、径向一阶频率12 Hz, 质量小于54.4 kg, 承载能力不小于1360 kg^[5]。2016年实现环球飞行的瑞士“阳光动力2号”太阳能飞机以及它的第一代飞机“阳光动力1号”的机身均采用了桁架结构构型^[6-7]。中国于2007年10月发射的“嫦娥一号”探月卫星的定向天线展开臂支架采用了碳纤维复合材料的支架结构, 而且“嫦娥一号”卫星的发动机支架也采用了三维编织碳纤维复合材料空间桁架^[8]。2010年发射的“嫦

* 收稿日期: 2016-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11202231, U1537101)

作者简介: 黄春芳(1988—), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, E-mail: hc8819sk@126.com;

江大志(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: jiangdz@nudt.edu.cn

娥二号”卫星上继续采用了复合材料支架作为发动机支架。国防科技大学的鞠苏博士从新型航天器对支撑结构部件提出的超轻质、大跨度、可伸缩需求出发,以开发大型超轻质支撑结构为目的,提出了一类新的全复合材料整体桁架结构——三角形截面复合材料整体桁架结构^[9-10]。根据当下趋势,桁架结构在航天航空领域的应用正从早期的非主承力件向主承力件发展,从小结构件向大结构件发展。而作为主承力结构件的复合材料桁架,其固有的振动特性以及结构承载能力决定了其在航天航空飞行器上的应用效果和应用水平^[11-12]。

锤击法是一种应用到金属结构振动测试的成熟方法,但目前应用在大型复合材料结构的振动测试相对较少^[13-15]。本文采用锤击法对一大型复合材料桁架结构的自由振动特性进行实验测试,将得到的试验模态和频率与有限元分析软件 ANSYS 分析得到的虚拟模态和频率进行对比分析,以验证锤击法应用于复合材料桁架结构振动特性测试的可行性和准确性。

1 方形截面大型复合材料桁架结构段

桁架结构的组成杆件按其拓展方向可以分为:纵向杆/管、横向杆/管和斜向杆/管。方形截面桁架的特点是材料分布远离结构截面形心,能最大限度提高桁架结构的截面抗弯系数,从而提高结构刚度,且构型的高度对称性使桁架具有较高的整体稳定性;构型简单,制备方便。

本文的主要目的是采用实验和有限元相结合的分析方法,对碳纤维复合材料桁架结构振动特性进行分析,验证锤击法应用于复合材料桁架结构振动测试的可行性和准确性。因此制备了如图 1 所示的方形截面桁架结构段,它由两个基本单元组成,只有纵向和横向管,没有斜向管。桁架结构段的纵向和横向管采用卷管工艺制备,在管状芯模上预先贴敷上碳纤维预浸料,通过卷管机的上下面板(其中下面板有类琴键的弹性支撑和橡胶软垫)搓卷而成胚体,加热固化脱模后得到管件;采用组合模具和手铺袋压工艺制备接头^[16-18],接头采用如图 1 所示的外套接形式;采用卷管工艺以及外套接形式能够很好地保证套接的尺寸匹配,最后通过套管胶接工艺组合成整体全复合材料桁架结构段,用于胶接管件和接头的胶为常温固化的环氧树脂结构胶,其性能能够保证桁架结构的良好胶结。

制备的复合材料桁架结构段的几何参数以及



图 1 振动实验测试用桁架结构段

Fig. 1 Composite truss for vibration test

所使用的材料参数如表 1 和表 2 所示。桁架纵向和横向管的铺层方案均为 $[(0/90)_0]_m$,管的内外各铺一层厚度为 0.2 mm 的 M40JB 碳纤维平纹布,中间为单层厚度 0.125 mm 的 M40JB 单向带,其中纵向管单向带铺层数 m 等于 9,横向管单向带铺层数 m 等于 4,树脂为环氧 648。

表 1 桁架结构段的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of the composite truss structure

几何参数	数值
外接圆直径/m	1.56
结构段长度/m	4.17
纵向管直径/mm	115.00
横向管直径/mm	58.00
纵向管壁厚/mm	1.50
横向管壁厚/mm	0.90

表 2 M40JB/环氧 648 复合材料性能参数

Tab. 2 Engineering constants of M40JB/ epoxy 648 composite

参数名	符号和单位	数值
纵向模量	E_1/GPa	180.00
横向模量	$E_2 = E_3/\text{GPa}$	9.02
面内剪切模量	$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	7.80
面外剪切模量	G_{23}	3.51
纵向泊松比	$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.30
横向泊松比	ν_{23}	0.28
密度	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.60

2 桁架振动特性的实验和有限元分析

2.1 锤击法与振动测试

锤击法是通过进行模态分析最常用的一种方法,

该方法是利用安装有力传感器的“力锤”击打(激励)被试验结构物,借助于现代测试技术和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)以脉冲试验原理和模态理论求得结构模态参数的一种快速、简便、有效的方法。在锤击实验中,通过锤击对被测结构物输入激励力信号,通过测量结构各点的响应输出加速度信号,再通过输入和输出信号之间的转换即可求得结构的传递函数,计算出结构的自由振动特性。

对系统结构输入一个脉冲信号,被测结构将会产生微幅振动,即产生位移、速度和加速度等响应信号。通过计算脉冲信号自功率谱 $S_{YY}(f)$ 、响应信号自功率谱 $S_{XX}(f)$ 以及脉冲响应信号互功率谱 $S_{YX}(f)$,可获得结构频响函数 $H(f)$ 和相干函数 $\gamma_{YX}^2(f)$,谱函数之间的关系为^[14]:

$$\begin{cases} H(f) = \frac{S_{YX}(f)}{S_{YY}(f)} \\ \gamma_{YX}^2(f) = \frac{|S_{YX}(f)|^2}{S_{XX}(f) \cdot S_{YY}(f)} \end{cases} \quad (1)$$

假设单位理想脉冲的持续时间为无穷小,用狄拉克函数表示即为:

$$\begin{cases} \delta(t) = \infty, t = 0 \\ \delta(t) = 0, t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases} \quad (2)$$

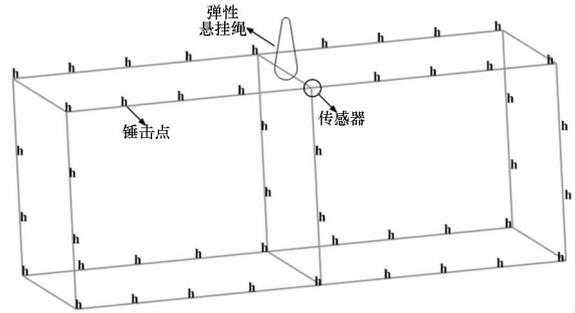
其傅里叶变换为:

$$F[\delta(t)] = F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i2\pi ft} dt = 1 \quad (3)$$

由于桁架是由各管件组装而成,结构具有空间不连续的特点,此外复合材料不同于金属材料,其具有各向异性,所以采用锤击法测试分析振动响应信号在复合材料桁架结构中的传递以及由此获得整体结构的振动性能是否具有可行性还有待验证。

利用锤击法对复合材料桁架结构进行模态分析时需要用到的仪器设备包括 DH132 型压电式加速度传感器、DH5927 动态信号采集分析仪、LC13F02 型力锤、DHDAS 控制分析软件。振动测试过程中采用弹性软绳在桁架结构段中间横杆中点处将其悬吊起来,使其处于近似自由振动状态。在桁架结构段中间接头处粘贴信号采集传感器,用以收集锤击时的振动信号,并传输给动态信号分析仪,如图 2 所示,在桁架各纵向管接头处和两接头之间均匀布置 5 个锤击点,在桁架各横向管两接头之间均布 2 个锤击点(图中只对一半结构

的一根纵向管和横向管进行标示)。测试时,用力锤依次在各锤击点施加多次激励以获得稳定振动信号,最后通过 DHDAS 控制分析软件将各锤击点的振动信号构建成整个桁架结构段的振动行为。

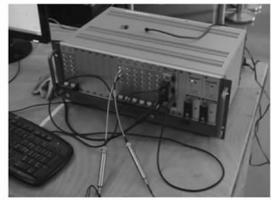


(a) 振动测试示意图

(a) Schematic of vibration test



(b) 加速度传感器
(b) Acceleration sensor



(c) 信号采集分析仪
(c) Signal analyzer

图 2 桁架结构段振动实验测试

Fig. 2 Vibration test of composite truss structure

2.2 有限元模型和分析结果

采用有限元分析软件 ANSYS 建立桁架结构段的几何模型,采用 BEAM189 梁单元划分有限元单元,并对模型不施加任何约束,采用模态分析计算桁架在自由振动下的振动模态和振动频率。有限元模型中,在桁架各管件连接处做平顺处理,即不考虑接头对模型的影响。图 3 为用于振动分析的桁架结构段有限元模型。利用该模型通过结构模态分析得出结构的振动频率和模态,其中该结构的前 25 阶振动频率如图 4 所示。前 6 阶频率为六个自由度上平动和转动频率,所有数值为

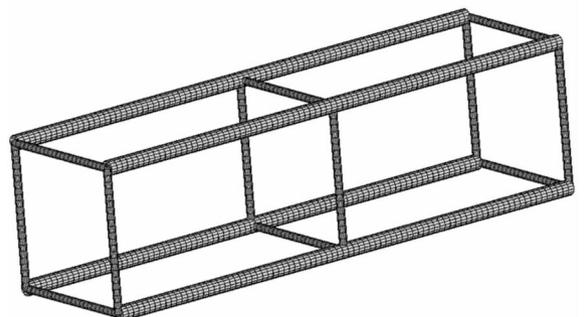


图 3 桁架结构段的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of composite truss structure

0 或很小。从给出的频率数据可知,其中有多处频率一致区域,这是由不同方向的同一种振动所产生的。

Results File: zhendong.rst

Available Data Sets:

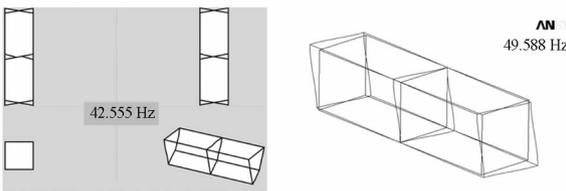
Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	0.0000	1	1	1
2	0.0000	1	2	2
3	0.0000	1	3	3
4	0.0000	1	4	4
5	1.10784E-04	1	5	5
6	6.18885E-04	1	6	6
7	23.607	1	7	7
8	45.117	1	8	8
9	49.588	1	9	9
10	49.588	1	10	10
11	56.659	1	11	11
12	72.529	1	12	12
13	78.503	1	13	13
14	78.503	1	14	14
15	86.024	1	15	15
16	111.55	1	16	16
17	144.69	1	17	17
18	144.70	1	18	18
19	144.84	1	19	19
20	144.84	1	20	20
21	194.59	1	21	21
22	194.63	1	22	22
23	194.75	1	23	23
24	194.75	1	24	24
25	199.17	1	25	25

图 4 有限元分析的桁架前 25 阶振动频率

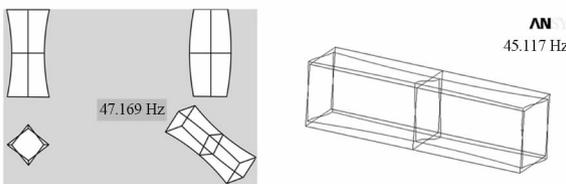
Fig. 4 The 1st to 25th natural frequencies of the truss by finite element analysis

2.3 振动实验测试结果与对比分析

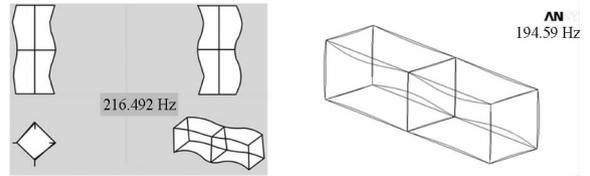
将实验测试得到的结构的振动模态和对应的振动频率与有限元分析结果进行对比分析。由于实验条件限制以及实测结构与有限元分析模型之间存在的误差,通过锤击法测试得到的桁架结构段的振动模态和频率并不能与模拟结果中的振动模态和各阶频率一一对应,但是如图 5 和表 3 所示,两者对桁架振动的典型模态的分析结果是很吻合的。



(a) 轴向对角伸缩振动
(a) Axial diagonal extension and compression vibration



(b) 中部张合振动
(b) Open and closed vibration in the middle of the structure



(c) 结构整体振动
(c) Whole structural vibration

图 5 桁架结构段典型振动模态的实验和有限元分析
Fig. 5 Typical natural vibration modes of composite truss structure via test and by finite element analysis

表 3 桁架结构段典型振动频率

Tab. 3 Typical natural frequency of the composite truss structure

振动模态	频率/Hz	
	实验测试	数值模拟
轴向对角伸缩振动	42.555	49.588
中部张合振动	47.169	45.117
结构整体振动	216.492	194.590

图 5 中每个子图的左图为实验测试得到的振动分析结果,右图为有限元分析得到的结果,表 3 为对应振动模态下的结构自由振动频率。两种分析方法得到的桁架结构段在几种典型振动模态下的振动模态和振动频率吻合得很好,这说明采用锤击法测试大型复合材料桁架结构的振动的试验方法是可行的,并具有足够的准确性。

3 结论

1) 分别采用有限元数值模拟方法和实验测试方法对复合材料桁架结构段的振动特性进行了分析,两种方法得到了相吻合的结构特征振动模态和频率。

2) 在有限元模型中,将组成桁架的各管的连接视为理想的平顺连接,即忽略实际接头影响,有限元模型能够准确模拟复合材料桁架结构的振动行为。

3) 实验测试和有限元模拟具有一致性的结果,说明锤击法适用于大型复合材料桁架结构段的振动测试,且结果可信。

参考文献 (References)

[1] 章令晖,李甲申,王琦洁,等. 航天器用复合材料桁架结构研究进展[J]. 纤维复合材料, 2013(4): 63-68. ZHANG Linghui, LI Jiashen, WANG Qijie, et al. The progress of research on composite truss for spacecraft [J]. Fiber Composites, 2013(4): 63-68. (in Chinese)

- [2] 司洪伟, 李东旭, 陈卫东, 等. 大挠性航天桁架结构动力学及其主动控制研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(2): 167-176.
SI Hongwei, LI Dongxu, CHEN Weidong, et al. Dynamic and active control of large flexible space truss: a review[J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(2): 167-176. (in Chinese)
- [3] 马立, 徐志红, 陈维强, 等. 航天器复合材料桁架结构的工程进展[J]. 航天制造技术, 2012(4): 6-9.
MA Li, XU Zhihong, CHEN Weiqiang, et al. Engineering progress in composite material truss of spacecrafts [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(4): 6-9. (in Chinese)
- [4] Oken S, Skoumal D E, Straayer J W. Design of a graphite/epoxy metering truss for the large space telescope [C]//Proceedings of 16th Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA, 2002.
- [5] Skullney W, Kreitz H, Harold M, et al. Structural design of the MSX spacecraft [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1996, 17(1): 59-74.
- [6] Böswald M, Govers Y, Vollan A, et al. Solar impulse—how to validate the numerical model of a superlight aircraft with A340 dimensions! [C]//Proceedings of ISMA 2010 - International Conference on Noise & Vibration Engineering, 2010: 2451-2466.
- [7] Laukkanen M. Project solaris-mass and balance analysis tool for a solar powered UAV[R]. Vaster, Sweden: Mälardalen University, 2009.
- [8] 赵展, Md. Hasab Iqbal, 李炜. 编织机及编织工艺的发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(10): 90-95.
ZHAO Zhan, Md. Hasab Iqbal, LI Wei. Development of braiding machine and braiding technology [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(10): 90-95. (in Chinese)
- [9] Ju S, Jiang D Z, Sheno R A, et al. Flexural properties of lightweight FRP composite truss structures [J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(19): 1921-1930.
- [10] Ju S, Sheno R A, Jiang D Z, et al. Multi-parameter optimization of lightweight composite triangular truss structure base on response surface methodology [J]. Composite Structures, 2013, 97: 107-116.
- [11] 漆文凯, 程博, 刘磊. 含分层损伤复合材料层合板振动特性[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 858-865.
QI Wenkai, CHENG Bo, LIU Lei. Vibration characteristic of composite laminates with delamination [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 858-865. (in Chinese)
- [12] 漆文凯, 程博, 刘磊. 复合材料层合板的振动模态试验研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(6): 53-58.
QI Wenkai, CHENG Bo, LIU Lei. Research of vibration modal experiment for composite laminates [J]. Aeroengine, 2013, 39(6): 53-58. (in Chinese)
- [13] Wang S Y, Zhang W, Zhang Q W, et al. Reliability analysis about A/C-axis of woodworking five-axis milling head [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 635/636/637: 407-410.
- [14] 王双永. 基于锤击法的木工双摆角铣头模态分析[J]. 制造业自动化, 2016, 38(2): 89-91, 110.
WANG Shuangyong. Modal analysis of woodworking swing milling head based on hammering method [J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(2): 89-91, 110. (in Chinese)
- [15] 杨揆. 模态试验技术的理论研究[J]. 装备制造技术, 2015(11): 264-265.
YANG Kui. Theoretical research of modal-test technology [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(11): 264-265. (in Chinese)
- [16] 鞠苏, 曾竟成, 江大志, 等. 碳纤维增强复合材料接头研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2006, 31(3): 29-35, 45.
JU Su, ZENG Jingcheng, JIANG Dazhi, et al. Study progress in carbon fiber reinforced composite joint [J]. Hi-Technology Fiber & Application, 2006, 31(3): 29-35, 45. (in Chinese)
- [17] 鞠苏. 复合材料桁架弯曲特性与非线性约束优化设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
JU Su. Flexural performance and design optimization with nonlinear constraints of a composite truss structure [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] 罗锡林. 复合材料桁架融合节点设计及其承载性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LUO Xilin. Design and loading capacity analysis in integrated joints of composite truss [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)