

应用 Isight 的复合材料桁架结构优化设计*

黄春芳,肖加余,郑青,鞠苏,江大志
(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:轻质复合材料及其结构以其优异的力学性能在航天航空飞行器上得到了广泛应用。考察玻璃纤维/环氧复合材料方形截面桁架在典型弯曲载荷工况条件下的非线性结构承载性能。采用 Isight 集成平台对桁架结构进行多参数优化设计,获得满足结构刚度和承载性能要求的最轻质桁架结构的几何参数,并分析最优化结构在载荷作用下的结构非线性响应行为。结果表明采用 Isight 平台对桁架结构进行多参数优化设计具有较高的效率和可信度。

关键词:玻璃纤维复合材料;桁架;Isight 集成平台;ANSYS;结构优化设计

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-039-05

Structural optimization of composite truss based on Isight platform

HUANG Chunfang, XIAO Jiayu, ZHENG Qing, JU Su, JIANG Dazhi

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Fiber reinforced composites have been widely used in aerospace and aircraft structures because of their excellent mechanical properties and light weight. Glass fiber reinforced epoxy composite truss with square cross section under three-point bending exhibits nonlinear behavior according to finite element analysis. On the Isight platform, a multi-parameter optimization method was conducted to obtain five key geometric parameters of the optimal composite truss, which met the demands of structural stiffness, load bearing and light weight. Nonlinear structural responses of the optimal composite truss were obtained. The results showed that the use of Isight platform has high efficiency and reliability for multi-parameter optimization of truss structure.

Key words: glass fiber reinforced epoxy composite; truss; Isight platform; ANSYS; structural optimization

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。桁架结构具有净空间值高、在空间容易展开或装配、受运载器整流罩尺寸限制小等优点,特别适合在大跨度甚至超大跨度结构中应用。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。因而桁架结构在各类航天器中得到了广泛的应用^[1]。

国外复合材料桁架结构的研究、应用较早,现已广泛应用于卫星、飞船、空间站、太空望远镜等航天器。哈勃太空望远镜光学系统支撑结构采用了桁架结构。该桁架结构采用石墨纤维/环氧复合材料制作,有4个环梁,分3层,每层16根斜杆^[2]。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:轴向频率35 Hz、

径向频率12 Hz,质量小于54.4 kg,承载能力不小于1360 kg^[3]。我国于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^[4]。2010年发射的“嫦娥二号”卫星上继续采用了复合材料支架作为发动机支架。2015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^[5-7]。桁架结构的优化设计目标是在满足承载要求的条件下,寻求质量最轻的桁架结构构型。与板、梁等常规结构相比,桁架结构,尤其是复合材料桁架结构,设计参数多、力学响应复杂,给桁架结构的优化设计提出了很大挑战。

起源于美国通用电气公司的 Isight 是功能强大的计算机辅助优化(Computer Aided Optimization,

* 收稿日期:2015-10-08

基金项目:国家863计划资助项目(2012AA03A205);国家自然科学基金资助项目(11202231)

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

CAO)平台,广泛应用于航空、航天、汽车、船舶、电子领域的零部件、子系统优化,以及结构多学科设计优化(Multi-disciplinary Design Optimization, MDO)。用户可以通过 Isight 集成和管理复杂的仿真流程,运用多种优化算法自动探索得到优化方案,从而缩短产品研制周期,降低研发成本^[8]。Isight 优化平台可以集成多种仿真分析软件如 NASTRAN, Abaqus, ANSYS 结构分析软件等,本文采用 ANSYS 作为仿真分析工具。

1 方形截面复合材料桁架结构

桁架结构是由纵向杆(longitudinal rib)、横向杆(transversal rib)和斜向杆(tilted rib)按照一定的排列次序组合而成的,研究的方形截面玻璃纤维/环氧树脂复合材料桁架的几何构型如图 1 所示,该构型的特点是材料分布远离结构截面形心,因此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。高度的构型对称性使桁架结构具有较高的整体稳定性。

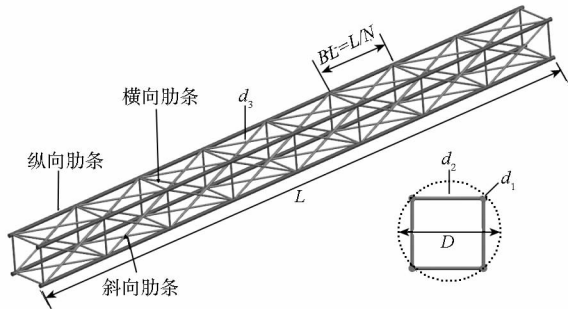


图 1 方形截面桁架结构构型和几何参数

Fig. 1 Composite truss with square cross section and its geometric parameters

桁架结构设计的变量主要是其几何参数,包括截面外接圆直径 D , 重复结构单元数 N , 纵向杆直径 d_1 , 横向杆直径 d_2 和斜向杆直径 d_3 。以总长为 5.2 m 的方形截面桁架结构为研究对象,以结构质量最小作为优化目标,将复合材料桁架的 5 个几何参数(D, N, d_1, d_2, d_3)作为设计变量,同时将复合材料桁架在三点弯曲载荷下的极限载荷最大位移作为约束,采用多岛遗传算法对桁架进行多参数非线性结构优化设计。

用于玻璃纤维/环氧树脂复合材料桁架有限元计算的材料性能参数见表 1。其中, $E_1, E_2, \nu_{12}, \sigma_t$ 和 ρ 为实测值, ν_{23} 和 τ 通过查阅复合材料设计手册^[9-10]得到, G_{23} 和 G_{12} 为通过工程常数间的关系^[11]估算得到。

表 1 用于有限元分析的复合材料桁架材料性能参数

Tab. 1 Material properties of composite truss used for finite element analysis

材料常数	玻璃纤维/环氧	
	纵向杆	非纵向杆
E_1/GPa	46.63	45.83
$E_2 = E_3/\text{GPa}$	8.40	8.40
$G_{12} = G_{13}/\text{GPa}$	4.70	4.70
G_{23}	4.14	4.14
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.28	0.28
ν_{23}	0.33	0.33
$\sigma_t = \sigma_c/\text{MPa}$	947.62	747.58
τ/MPa	62.00	62.00
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.09	2.06

2 复合材料桁架结构优化设计

2.1 优化模型设计

复合材料整体桁架结构的优化属于非线性约束下的优化设计问题。非线性结构行为通常由以下原因引起:状态改变,如由接触状态变为不接触状态;材料非线性,如金属材料由弹性变形阶段过渡到塑性变形阶段;几何非线性,如结构大变形或扭转变形后引起结构构型的改变^[12]。在对复合材料整体桁架结构进行优化的过程中将其几何非线性力学行为下的结构响应量作为约束条件,属于几何非线性约束优化设计。对于三点弯曲载荷下方形截面复合材料整体桁架,其承载能力可由屈曲极限载荷表征,因此对其承载能力和结构刚度的要求实际上就是约束屈曲极限载荷 L'_i 及对应的屈曲载荷下最大位移 S'_i 。由此,该构型复合材料整体桁架结构的优化问题可采用以下公式进行描述。

优化目标为桁架结构的总质量 W , 总质量 W 与 5 个设计变量(D, N, d_1, d_2, d_3)间的关系如式(1)所示。其中 f 为目标函数,优化过程中应使其最小化。 ρ_l 和 ρ_h 分别为桁架纵向及螺旋向肋条密度。

$$W = f(D, N, d_1, d_2, d_3)$$

$$= 4\rho_l L \frac{\pi d_1^2}{4} + 8(N+1)\rho_h \frac{\sqrt{2}D}{2} \cdot \frac{\pi d_2^2}{4} + \quad (1)$$

$$8N\rho_h \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}D}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{N}\right)^2} \cdot \frac{\pi d_3^2}{4}$$

对非线性结构响应量——载荷-位移曲线的

屈服点数据 (S_i, L_i) 进行约束。

$$L_i = g_1(D, N, d_1, d_2, d_3) \geq L_i^p \quad (2)$$

$$S_i = g_2(D, N, d_1, d_2, d_3) \leq S_i^p \quad (3)$$

其中: g_1 和 g_2 为状态函数,是关于 5 个设计变量间的函数,是优化过程中必须始终满足的条件。参照 Ju^[13-14] 论文中采用的设计参数值, L_i^p 和 S_i^p 分别取值为 1000 N 和 20 mm(即载荷-位移曲线屈服点载荷 $L_i \geq 1000$ N,位移 $S_i \leq 20$ mm)。5 个设计变量 D, N, d_1, d_2, d_3 的取值范围(国际单位制)为:

$$0.19 \leq D \leq 0.65 \quad (4)$$

$$10 \leq N \leq 40 \quad (5)$$

$$0.004 \leq d_1 \leq 0.01 \quad (6)$$

$$0.004 \leq d_2 \leq 0.01 \quad (7)$$

$$0.004 \leq d_3 \leq 0.01 \quad (8)$$

2.2 复合材料桁架多参数优化设计的 Isight 实现

Isight 作为一种优化设计的工具,具有丰富的优化算法和多种代理模型方法,是一个开放的集成平台,它提供的过程集成界面可以方便地将各种工具(如商业 CAD 软件,各种有限元计算分析软件及用户自行开发的程序等)集成在一起。ANSYS 参数化设计过程中的关键部分是生成分析文件并保证其正确性。在分析文件中,模型的建立必须是参数化的,结果也必须用参数来提取,分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简练的。整个流程如图 2 所示,Isight 首先读取可用于 ANSYS 结构分析的参数化文件,通过参数设置共享各设计变量,然后调用 ANSYS 程序进行结构分析,分析完成后 Isight 将 ANSYS 的计算结果从指定的输出文件中提取出来,最后进行后处理。在图 2 的分析流程中,Input.txt 是 ANSYS 的 APDL 命令流文件,Output.txt 是 ANSYS 计算的部分结果文件,它是从 ANSYS 输出结果中提取优化分析需要的结果所生成的文件。

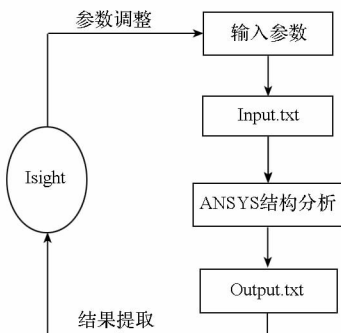


图 2 Isight 集成 ANSYS 流程

Fig. 2 Integration flow chart of ANSYS on Isight platform

利用 Isight 平台设计的优化计算线程如图 3 所示,由优化计算组件,质量计算组件和 ANSYS 结构设计组件构成一个循环计算回路。通过优化组件设置复合材料桁架结构优化设计的设计变量、约束变量和目标函数,通过质量计算组件计算目标函数值以及通过 ANSYS 结构设计组件得到结构分析结果。循环计算线程可以将每次计算的各参数值传递给优化设计组件,优化组件采用多岛遗传优化算法对各参数进行取值和对目标函数进行寻优。遗传算法是一种新的全局优化搜索算法,因其简单通用、鲁棒性强、适于并行处理,在过去 20 年中已广泛应用于计算机科学、优化调度、运输问题、组合优化、复杂函数系统优化、机器学习、系统识别、神经网络设计等领域^[15]。

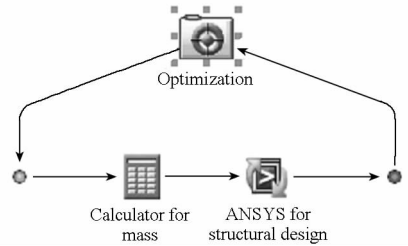


图 3 桁架结构优化设计计算线程

Fig. 3 Flow chart of optimization of composite truss

在 Isight 平台上,复合材料桁架结构优化设计的目标函数、设计变量、约束变量和优化目标变量均可通过平台中各输入模块进行设置。其中设计变量 hN 为重复结构单元数的 1/2,目的是为了 保证 N 为偶数。

3 结果讨论与分析

利用 Isight 平台对方形截面复合材料桁架进行多参数优化计算后的结果如图 4 所示,其中序号为 902 的计算结果为最优化设计结果。基于得到的最优化构型参数,建立桁架结构的有限元模型,其在三点弯曲载荷下的结构非线性响应的载荷-位移曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,复合材料桁架结构刚度变化分为两个阶段:①线性阶段,载荷 0 ~ 1100 N;②非线性阶段,载荷大于 1100 N。在线性阶段,组成桁架结构的各杆件发生微小弹性变形,在载荷作用下载荷和位移呈线性关系;随着载荷的增大,杆件开始发生大变形,从而结构刚度下降;继续增大载荷,发生大变形的杆件数量逐渐增加,载荷和位移呈非线性关系由于复合材料具有脆性破坏特征,图 5 中载荷-位移曲线非线性区域范围很小;当载荷增加到一定程度时,杆件发生断裂从而导致结构破坏失去承

载能力, 载荷 - 位移曲线出现“平台”。

Optimization									
Run Path									
			d1	d2	d3	W	Dis	Weight	
1	901	0.3648	0.006503	0.0042183	0.004497	12	0.016879	4.074	
1	902	0.3649	0.0064957	0.0042184	0.0044973	12	0.017071	4.0496	
1	903	0.3652	0.0064956	0.0042184	0.004497	12			
1	904	0.43269	0.0064957	0.0042503	0.004497	12			
1	905	0.3648	0.0064957	0.0042184	0.004497	12	0.017062	4.0575	
1	906	0.3649	0.0064958	0.0042184	0.004497	12	0.017062	4.0575	

图 4 复合材料桁架优化计算结果

Fig. 4 Optimal results of composite truss

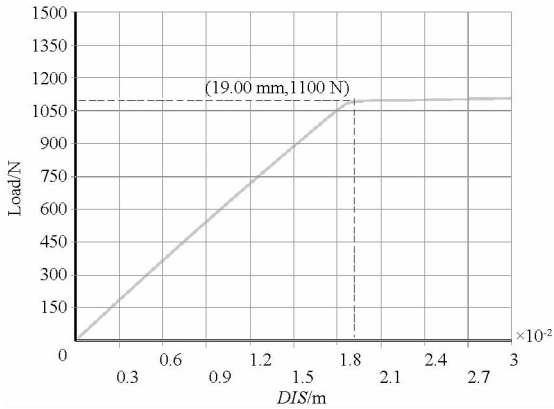


图 5 复合材料桁架的非线性结构响应曲线

Fig. 5 Nonlinear structural response curve of composite truss

将 Isight 平台多参数优化后的结果与文献[14]中采用响应面法优化的结果列入表 2, 对比分析可知, 本文设计的方形截面复合材料桁架结构质量稍轻, 而且结构在同一极限载荷水平下的极限位移小于文献[14]中的优化结果。由于 Isight 在整个优化过程可以实现自动循环计算, 因此, 相对文献[14]采用的响应面优化方法而言其更“智能”, 效率更高。

表 2 与文献[14]最优化结果对比

Tab. 2 Comparison with the optimal results in reference [14]

No.	文献[14]	本文
D/mm	348.20	384.80
N	30	24
d_1/mm	8.59	6.47
d_2/mm	4.00	4.22
d_3/mm	4.00	4.49
W/kg	4.281	4.049
S_i/mm	24.84	19.00
L_i/N	1144.00	1100.00

4 结论

1) 采用 Isight 平台能够对有限元分析软件、质

量计算组件和结构优化设计组件进行集成, 能够实现桁架结构各设计变量的自动取值和结构优化计算的全自动化, 从而使整个优化过程效率更高。

2) 通过 Isight 平台对复合材料桁架结构进行多参数优化设计, 获得了满足结构刚度和承载性能要求的最轻质桁架结构的几何参数。

3) 满足设计目标要求总长为 5.2 m 的复合材料方形截面桁架结构的最优化结果为截面外接圆直径 384.80 mm, 纵向杆直径 6.47 mm, 横向杆直径 4.22 mm, 斜向杆直径 4.49 mm, 重复结构单元数 24, 质量 4.049 kg。

4) 分析了最优化结构在载荷作用下的结构非线性响应行为, 并与文献[14]进行对比, 证明了其为最优化结果。说明采用 Isight 平台对结构进行多参数优化设计不仅效率高而且结果具有较高的可信度。

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] Oken S, Skoumal D E, Straayer J W, et al. Design of a graphite/epoxy metering truss for the large space telescope[C]. AIAA, 2002: 89-1106.
- [3] Skullney W E, Kreitz H M, Harold M J, et al. Structural design of the MSX spacecraft[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1996, 17(1): 65-69.
- [4] 纤维复合材料助推“嫦娥一号”成功探月, 中国玻璃钢[N/OL]. 2008[2008-01-04]. <http://www.cnfrp.net/news/echo.php?id=24050>. The fiber composite material boost “Chang E One” successful lunar exploration, China FRP[N/OL]. 2008[2008-01-04]. <http://www.cnfrp.net/news/echo.php?id=24050>. (in Chinese)
- [5] 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 Including USD 2010, Leuven(Begium), 2010: 2451-2466.
- [6] Laukkanen M. Project solaris-mass and balance analysis tool for a solar powered UAV[R]. Vaster, Sweden: Mölardalen University, 2009.
- [7] 世界最大太阳能飞机飞抵中国[N/OL]. 2015[2015-03-31]. <http://tech.sina.cn/solarimpulse/news/2015-03-31/detail-ichmifpy3244181.d.html?vt=4&cid=106753>. The world's largest solar-powered aircraft flew to China[N/OL]. 2015[2015-03-31]. <http://tech.sina.cn/solarimpulse/news/2015-03-31/detail-ichmifpy3244181.d.html?vt=4&cid=106753>. (in Chinese)
- [8] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 3-4. LAI Yuyang. Parameter optimization theory and example explanation of Isight[M]. Beijing: Beijing University of

- Aeronautics and Astronautics Press, 2012: 3 - 4. (in Chinese)
- [9] 丁惠梁, 沈真, 樊发芬, 等. 空间结构用复合材料设计手册(欧洲航天局) [M]. 北京: 怀柔黄坎印刷厂, 1992: 34 - 49.
- DING Huiliang, SHEN Zhen, FAN Fafen, et al. Spatial structure composite materials Design Manual (European Space Agency) [M]. Beijing: Huairou Huangkan Printing, 1992: 34 - 49. (in Chinese)
- [10] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 121 - 428.
- CHEN Xiangbao. Polymer matrix composites manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 121 - 428. (in Chinese)
- [11] 李顺林, 王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003: 8 - 13.
- LI Shunlin, WANG Xingye. Composite structure design basis [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003: 8 - 13. (in Chinese)
- [12] ANSYS help documentation/nonlinear structural analysis/tips and guidelines for nonlinear analysis [Z]. US: ANSYS Inc., 2007.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 丁承民, 张传生, 刘辉. 遗传算法纵横谈[J]. 信息与控制, 1997, 26(1): 40 - 47.
- DING Chengmin, ZHANG Chuansheng, LIU hui. Talk about genetic algorithms [J]. Information and Control, 1997, 26(1): 40 - 47. (in Chinese)