

# 航天器发动机推力支架桁架结构的有限元分析与优化设计\*

彭超义 曾竟成 肖加余 杜刚 杨孚标

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

**文 摘** 对某航天器上的推力支架结构和承载状态进行了分析,设计了一系列桁架结构,以碳纤维/环氧复合材料管件作为桁架结构的组成构件,采用有限元分析软件 Ansys7.0 对桁架结构的尺寸进行了优化,并优选出桁架质量和载荷相同条件下承载性能最好的桁架结构形式。

**关键词** 推力支架,结构分析,桁架结构,优化设计,有限元

## Finite Element Analysis and Optimum Design for Thrust Truss Structure of Spacecraft

Peng Chaoyi Zeng Jingcheng Xiao Jiayu Du Gang Yang Fubiao

(Astronautics and Materials Institute, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

**Abstract** A series of thrust truss structures are designed by analyzing mechanical properties of the thrust truss structure and its loading status on some spacecraft. Carbon/epoxy composite tubes are used as the truss spars. Finite element analysis software Ansys7.0 is used to optimize dimensions of the truss structures, and the best truss structure is selected under same truss mass and load conditions.

**Key words** Thrust, Structural analysis, Truss structure, Optimum design, Finite

### 1 引言

航天器发动机产生的巨大推力经由推力支架传递到液氢和液氧储罐上,从而推动航天器飞行前进。空间桁架结构是大载荷下的主承载结构,如美国航天结构集团 Godrich 公司为 NASA 的“冒险星”生产的 GRID-LOCK<sup>®</sup>桁架结构,包括连接液氧贮箱和液氢贮箱的 IM7/APC2 热成型桁架结构,连接发动机与两个液氢贮箱的碳纤维/环氧复合材料和硼-碳纤维/环氧混杂复合材料多功能推力桁架结构;日本

ERS-1 卫星壳体内部主要由 M40 制成的 0.5 m CFRP 的推力筒是主承载部件,用以支撑设备架、太阳能电池阵和设备架上固定的各种仪器设备;法国宇航公司(Aerospatiale)将碳纤维或玻璃纤维/环氧复合材料制作的应力传输轴用于机场支架,此传输轴压力可达 294 kN 以上,拉力可达 245 kN,比用金属质量减轻 30%。

推力支架是由下端框、上端板、接头和杆件等组成的空间桁架结构(图 1)。为了降低其质量而又保

收稿日期:2003-05-12;修回日期:2003-08-11

\*国家 863 项目基金资助:2002AA 724 052

彭超义,1977 年出生,博士研究生,主要从事聚合物基复合材料工艺及其结构力学的研究工作

宇航材料工艺 2003 年 第 6 期

— 21 —

证桁架结构的承载稳定性,主要有两条途径:一是采用比强度和比刚度大的复合材料代替传统金属材料作为主承载构件;二是对桁架结构形式和尺寸进行优化设计,使承受相同载荷的桁架尽可能轻量化。在载荷很大很复杂的情况下,推力支架的质量要求又十分苛刻,因而其结构设计要求很高。

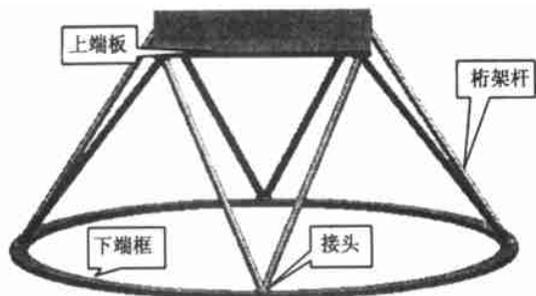


图1 推力支架模拟结构

Fig. 1 Simulating structure of thrust truss

采用碳纤维/环氧管件(基本参数:压缩模量  $E$  106 GPa,主泊松比  $\mu = 0.28$ ,压缩强度  $\sigma_c$  800 MPa)作为组成桁架的杆件,桁架总质量 50 kg,要求满足承载复杂大载荷要求。在此基础上,设计了四种桁架结构,用来模拟推力支架的空间桁架结构,如图 2~图 5。

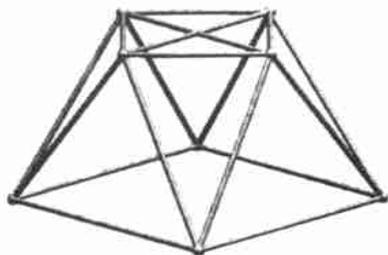


图2 1#桁架结构

Fig. 2 No. 1 truss structure

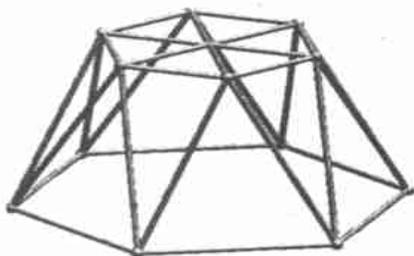


图3 2#桁架结构

Fig. 2 No. 2 truss structure

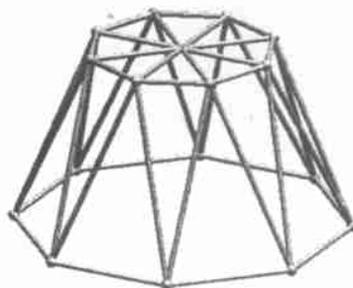


图4 3#桁架结构

Fig. 4 No. 3 truss structure

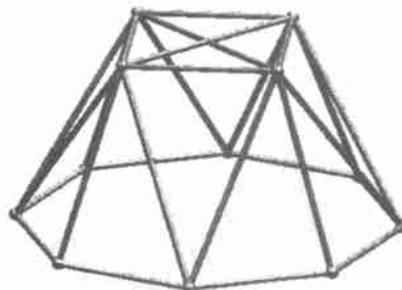


图5 4#桁架结构

Fig. 5 No. 4 truss structure

桁架结构的基本尺寸要求:下端框外接圆直径 1.5 m,上端板外接圆直径大小和桁架高度可以优化,桁架结构形式可以选择,采用 Ansys7.0 对各种桁架结构的承载性能进行计算比较,优化桁架结构的尺寸,优选出相同载荷下承载性能最好的桁架结构<sup>[1~4]</sup>。

## 2 有限元模型的建立

采用 Ansys7.0 元素库中 LINK8 3-D 杆件代表复合材料管件<sup>[5]</sup>。LINK8 为三维空间承受轴向拉力—压力的杆件,杆件采用铰接方式连接,接头称之为节点,每个节点具有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  位移方向的三个自由度。以 LINK8 3-D 杆件组成推力支架空间桁架结构的模拟模型(图 2~图 5)。下端框各节点要固定于液氢液氧储罐上,所以施加的位移约束限制节点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  位移方向的位移。上端板要与发动机连接,各节点承受发动机工作时施加的各种载荷。

发动机工作施加给桁架的载荷主要有以下四种形式:(1)垂直压力载荷,2 000 kN(根据美国 X-33 空天飞机发动机推力大小);(2)垂直压力载荷由于微小角度的偏转,对支架产生侧向分力,分力大小

宇航材料工艺 2003 年 第 6 期

17 kN(偏角为 5°);(3) 发动机在飞行器飞行过程中,由于飞行状态的调整等原因,将对支架产生惯性扭转作用,设为 100 kN·m;(4) 以上载荷同时作用。

以桁架结构承载时发生的节点位移来衡量其承载性能的好坏,以杆件的轴向应力和应变大小作为辅助参考指标。节点位移指桁架承受载荷时,桁架变形而导致节点在空间移动的距离。

### 3 计算与分析

推力支架设计的基本要求是保证连接在液氢储罐上的下端框直径为 1.5 m,桁架高度和上端板外接圆直径以及桁架杆件的排布方式可以设计。推力支架主要载荷为垂直压力,先在垂直压力载荷下优化桁架高度和上端板的外接圆直径的设计,确定桁架结构的基本尺寸之后,再比较不同桁架结构的综合承载性能,从而达到推力支架桁架结构的优化设计目的。

#### 3.1 桁架高度的优化计算

在下底外接圆直径固定为 1.5 m 的条件下,参照某火箭发动机推力支架的尺寸,上底外接圆直径预先设定为 0.95 m,高度预先设定为 0.54 m。由于发动机施加于推力支架的主要载荷为垂直压力,所以以垂直压力 2 000 kN 作为桁架高度优化设计的参考载荷。在 2 000 kN 的垂直压力下,四种桁架结构的高度依次从 0.44 m 增加到 1.24 m,计算不同高度下桁架的节点位移。以节点位移、杆件轴向应变对桁架高度作图,可以看出各桁架结构形变随高度的变化趋势,见图 6~图 9。

在相同载荷下,节点位移和杆件轴向应变越小,表明桁架承载性能越好,从图 6~图 9 可以看出,桁架的高度在 0.8 m 比较合适。

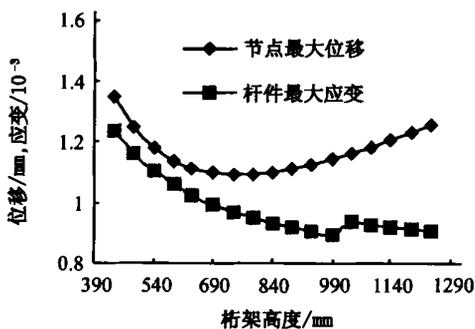


图 6 1# 桁架结构形变趋势

Fig. 6 Deformation trend of No. 1 truss structure

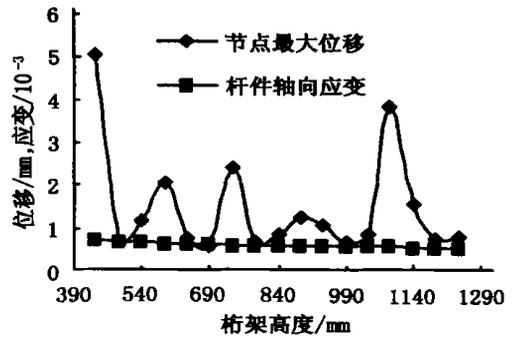


图 7 2# 桁架结构形变趋势

Fig. 7 Deformation trend of No. 2 truss structure

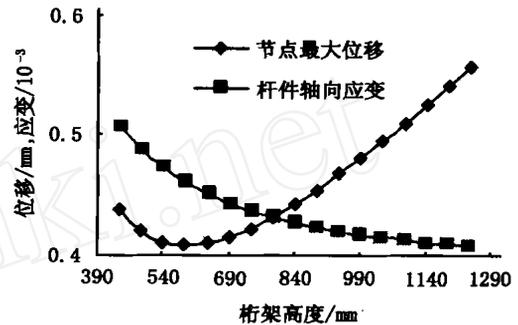


图 8 3# 桁架结构形变趋势

Fig. 8 Deformation trend of No. 3 truss structure

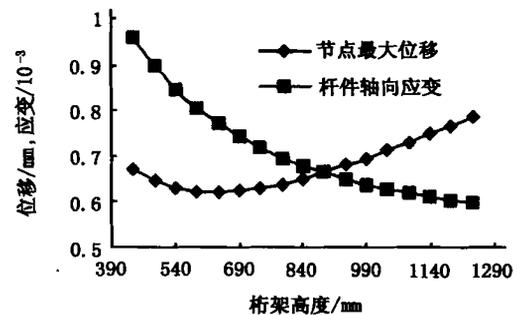


图 9 4# 桁架结构形变趋势

Fig. 9 Deformation trend of No. 4 truss structure

#### 3.2 上端板外接圆直径的优化计算

下端框直径 1.5 m,桁架高度 0.8 m,垂直压力 2 000 kN,四种桁架结构的上端板直径从 0.3 m 增加到 0.5 m,计算不同上端板直径下桁架承载发生的节点位移。以节点位移对上端板直径作图(图 10)。

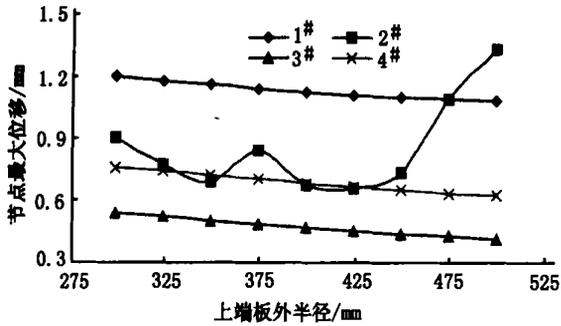


图 10 上端板尺寸变化对桁架承载性能的影响

Fig. 10 Influence of dimension changing of the top board on the truss performance

随着节点位移变小,桁架的承载性能变好,综合考虑上述四种模型,从图 10 可以看出,上端板外接圆直径为 0.85 m 比较合适。

### 3.3 不同桁架结构综合承载性能优化计算

综合 3.1 和 3.2 步的计算结果,确定桁架结构下端框直径为 1.5 m,上端板外接圆直径为 0.85 m,桁架高度为 0.8 m。设定桁架杆件总质量为 50 kg,根据优化后的尺寸重新构建上述四种桁架结构,进行综合承载计算考核。垂直载荷: $N_1 = 2\ 000\ \text{kN}$ ,扭转载荷: $M = 100\ \text{kN}\cdot\text{m}$ ,横向分力: $N_2 = 170\ \text{kN}$ ,承载情况见表 1~表 4。

表 1 垂直载荷下桁架的承载情况<sup>1)</sup>

Tab. 1 Perpendicular loads on the truss structures

桁架编号	$U_{\text{sum}}$ /mm	$U_x$ /mm	$U_y$ /mm	$U_z$ /mm	$/10^5\text{GPa}$	$/10^{-4}$
1#	1.111	0.0364	0.0364	1.111	1.006	9.49
2#	0.662	0.114	0.0984	0.652	0.633	5.97
3#	0.460	0.0634	0.0634	0.456	0.464	4.38
4#	0.671	0.0672	0.0672	0.667	0.728	6.87

注:1)  $U_{\text{sum}}$ 表示节点空间最大位移的大小,  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别表示节点在空间坐标方向的位移分量的大小,  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别表示杆件轴向应力,  $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$  分别表示杆件轴向应变。

在垂直压力载荷下,从表 1 中可以看出,3# 桁架结构节点位移和杆件应力应变值都最小,表明 3# 桁架结构承受垂直载荷的性能最好。

表 2 垂直载荷加扭转载荷桁架的承载情况

Tab. 2 Perpendicular and torsional loads on the truss structures

桁架编号	$U_{\text{sum}}$ /mm	$U_x$ /mm	$U_y$ /mm	$U_z$ /mm	$/10^5\text{GPa}$	$/10^{-3}$
1#	1.163	0.249	0.342	1.111	1.213	1.144
2#	1.703	1.318	1.318	0.998	0.818	0.771
3#	0.645	0.360	0.452	0.466	0.637	0.601
4#	0.753	0.249	0.343	0.667	0.806	0.760

在垂直载荷和扭转载荷同时作用下,从表 2 中可以看出,3# 桁架结构节点位移和杆件应力应变值都最小,表明 3# 桁架结构承受垂直载荷加扭转载荷的性能最好。

表 3 垂直载荷加横向分力桁架的承载情况

Tab. 3 Perpendicular and horizontal loads on the truss structures

桁架编号	$U_{\text{sum}}$ /mm	$U_x$ /mm	$U_y$ /mm	$U_z$ /mm	$/10^5\text{GPa}$	$/10^{-3}$
1#	1.297	0.545	0.364	1.178	1.264	1.192
2#	3.059	2.348	2.514	1.503	0.832	0.785
3#	0.950	0.681	0.0666	0.663	0.684	0.645
4#	0.944	0.530	0.0672	0.781	0.837	0.790

在横向分力作用下,4# 桁架的节点位移最小,3# 桁架的杆件轴向应力应变值最小,这两种桁架结构各有优势。

表 4 垂直载荷、扭转载荷加横向分力桁架的承载情况

Tab. 4 Perpendicular, torsional and horizontal loads on the truss structures

桁架编号	$U_{\text{sum}}$ /mm	$U_x$ /mm	$U_y$ /mm	$U_z$ /mm	$/10^5\text{GPa}$	$/10^{-3}$
1#	1.342	0.677	0.343	1.178	1.414	1.334
2#	4.835	3.633	3.805	1.871	0.978	0.923
3#	1.096	0.934	0.452	0.663	0.822	0.775
4#	1.004	0.644	0.342	0.781	0.987	0.931

在三种载荷综合作用下,4# 桁架的节点位移最小,3# 桁架杆件轴向应力应变值最小,这两种桁架结构各有优势。综合上述全部承载情况看来,对推

(下转第 38 页)

1994:1

2 Saycles D C. Anticipated interceptor propulsion technology advancement by the late 1990's. AIAA 92-1723

3 赵克熙. 原苏联芳纶复合材料研究进展及其在固体火箭发动机壳体上的应用. 宇航材料工艺, 1995; 25(5): 8

4 曾金芳. F12/ 环氧复合材料力学性能研究. 宇航材料工艺, 1999; 29(2): 24

5 Chiao T T et al. Performance of filament-wound vessels from an organic fiber in several epoxy matrixes. In: Proceeding 7th national SAMPE technology conference, Oct. 14 ~ 16, 1975

6 Chiao T T. Aramid fiber and composite. Lawrence Livermore laboratory. UCRL-80400 12. 21, 1977

7 Chiao T T et al. Filament-wound kevlar 49/ epoxy pressure vessels. NASA N74-22533

8 Chiao T T et al. High-performance vessels from an aramatic polyamide fiber/ epoxy NASA CR-134 506, 1973

9 王伯亚, 方东红. 高性能环氧树脂配方研究. 固体火

箭技术, 1997; 20(1): 62

10 王斌, 杨建奎, 张翔, 程皓. 芳纶纤维湿法缠绕容器研究进展. 宇航材料工艺, 1999; 22(4): 52

11 Mumford N A et al. Matrix/fiber interface effects on kevlar pressure vessel performance. AIAA-82-1069

12 鱼水. 航天用改性芳酰胺纤维. 国外固体火箭技术, 1986; (4): 77

13 刘文会, 丘哲明, 杨建奎. 偶联剂处理 APMOC 纤维应用研究. 固体火箭发动机复合材料工艺, 1995; (1): 12

14 王斌, 丘哲明, 杨建奎, 李洪国. 空气冷等离子体对 APMOC 纤维表面处理初探. 固体火箭发动机复合材料工艺, 1995; (1): 20

15 雷海锋. 有机纤维复合材料工艺研究——缠绕张力研究(之二). 固体火箭推进, 1987; (2): 20

16 杨建奎. F-12 纤维预浸成型工艺研究. 宇航材料工艺, 2000; 30(6): 14

(编辑 马晓艳)

(上接第 24 页)

力支架的主要负载形式而言, 以 3<sup>#</sup> 桁架结构承载性能最好, 4<sup>#</sup> 桁架结构承载性能次之。

#### 4 结论

借助于 Ansys 7.0 软件, 采用有限元方法对某航天器发动机推力支架的桁架结构进行的优化设计表明: (1) 在承受大载荷时, 推力支架的下端框直径为 1.5 m 时, 上端板外接圆直径为 0.85 m, 高度为 0.8 m 较为合适; (2) 空间桁架结构采用 16 根管件, 以正八边形交错排列的结构形式 3<sup>#</sup> 桁架结构承载性能最好。

#### 参考文献

1 陈精一, 蔡国中. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 216 ~ 218

2 Mojtabeh Masoud, Carlin Jeffrey T. Failure analysis of a 'J' bracket. American Society of Mechanical Engineers (Paper). ASME, Fairfield, NJ, USA, 1998: 1 ~ 5

3 Fahy Martin, Tiernan Stephen. Finite element analysis of ISO tank containers. Journal of Materials Processing Technology, 2001; 119(1 ~ 3): 293 ~ 298

4 任怀宇, 史晓红, 张家琪. 导弹仪器支架有限元分析. 导弹与航天运载技术, 2000; (5): 11 ~ 16

5 薛继军, 许爱荣, 赵志丽等. 钻井机架有限元模态分析. 石油矿场机械, 2001; 30(6): 44 ~ 46

(编辑 李洪泉)