

# 基于拓扑优化的冲压发动机主安装节承力结构设计

石 波, 杨广杰, 戴 进, 周 杰, 樊根民  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**针对冲压发动机主安装节承力结构优化,开展集中力扩散结构设计。首先采用工程方法设计放射肋扩散结构方案,然后开展拓扑优化设计。通过平板结构优化算例验证适合此类工程问题的内力均匀性约束条件,采用全域粗网格模型求解优化设计域、精细网格模型求解结构方案的二轮优化迭代的拓扑优化方法,得到最终优化结果。通过工程设计法与拓扑优化方法的对比,证明拓扑优化方法更适合处理多方向、多工况载荷的集中力扩散结构工程问题。结构拓扑优化方案对比放射肋方案:结构质量减轻 2.6%;对应最大载荷(工况 3)的结构最大变形量减少 4.4%,结构最大应力减少 10%;集中力扩散效果更好。设计方法的有效性得到验证,为集中力扩散结构优化探索出实用的设计思路和方法。

**关键词:**冲压发动机;发动机安装节;集中力扩散;拓扑优化

**中图分类号:**V431 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)05-0054-07

## Structure design of main mounting in ramjet engine base on topology optimization

SHI Bo, YANG Guangjie, DAI Jin, ZHOU Jie, FAN Genmin  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to optimize the load-bearing structure of the main mounting joint in ramjet engine, the structure design of concentrated force diffusion was carried out. Firstly, the radial rib structure was designed by engineering method, and then the topology optimization was carried out. The constraint condition of internal force uniformity suitable for the diffusion structure was verified by the optimization example of plate structure. The global coarse mesh model was used to get the design domain and the fine mesh model was used to optimize structure, and the final scheme was obtained through two rounds of optimization iterations. Through the comparison between the engineering design method and the topology optimization method, it is proved that the topology optimization method is more suitable to deal with the concentrated force diffusion structure with multi-directions and multi-condition loads. Compared with the radial rib scheme, the topology optimization scheme can reduce the structural mass by 2.6%, the maximum deformation under the maximum load (case 3) by 4.4%, the maximum stress by 10%, and the effect of concentrated force diffusion is better. The effectiveness of this method has been proved, which provides a practical design idea and method for the structure optimization of concentrated force diffusion.

收稿日期:2021-06-10;修回日期:2021-07-16

作者简介:石波(1980—),男,硕士,高级工程师,研究领域为冲压发动机总体设计。

**Keywords:** ramjet engine; engine mounting joint; concentrated force diffusion; topology optimization

## 0 引言

冲压发动机作为超声速飞机的动力使用时,发动机安装方案采用了类似航空发动机在飞机上安装结构,即由多个主、辅安装节构成的安装连接系统与飞机的机舱内框架平面安装定位连接<sup>[1]</sup>。发动机推力载荷和部分惯性载荷通过主安装节处的推力销传递到机身结构,推力销与飞机结构连接的设计要求具有高的可靠性,并且可反复拆装。推力销与发动机主安装节处的球窝座相连接,其典型结构形式如图1所示<sup>[2-3]</sup>。球窝座附近的发动机承力机匣为薄壁结构,因此其连接区域需要设计成承力框架用于分散所需传递的集中载荷。在满足发动机的强度和可靠性指标的前提下,对主安装节处的集中力扩散结构开展优化设计,可以为发动机减质、减低应力、提升工作寿命做出更大贡献。

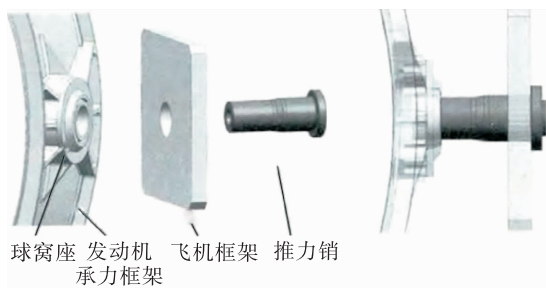


图1 推力销连接结构

Fig.1 Connection structure of thrust pin

针对集中力扩散结构设计,国内外学者开展了研究工作。文献[4-6]通过对 Michell 桁架的研究,在质量和应力约束条件下,得到集中力传递到离散或连续支座上的最优杆系结构。拓扑优化能从本质上改变结构的拓扑形式从而得到材料在空间上的最佳分布,常用方法有:均匀化方法、人工密度法、进化结构优化方法<sup>[7]</sup>、水平集方法<sup>[8]</sup>等。近年来,拓扑优化在集中力扩散结构设计领域得到广泛应用。张晓颖等通过扩散结构工程算法、拓扑优化及有限元分析,研究了运载火箭薄壁贮箱的结构部件对集中力的逐级扩散效率<sup>[9]</sup>。梅勇等研究改良

运载火箭捆绑联接舱段集中力扩散结构的承力特性,并对助推安装支座开展拓扑优化设计<sup>[10]</sup>。牛飞等提出集中力扩散结构优化理论模型,采用体积和内力均匀性约束针对火箭贮箱短壳开展优化设计<sup>[11]</sup>。张家鑫等探索了分级型放射肋设计应用于集中力扩散结构的优势和效果<sup>[12-13]</sup>。综合上述文献,可以发现传统的工程算法为避免结构失效往往得到比较保守的设计,放射肋扩散结构效率低,处理多方向、多工况载荷问题时,分析比较繁琐,计算效率低。采用结构拓扑优化可以得到更佳的集中力扩散结构优化方案,但存在两个关键点:①内力均匀性约束条件的算法影响结构的集中力扩散效果;②拓扑优化的求解域的确定。求解域过大存在计算效率低、费时长的问题;求解域过小可能会影响设计方案的准确性。

本文针对冲压发动机主安装节承力结构优化,开展集中力扩散结构设计。首先采用工程方法设计放射肋扩散结构方案,然后开展拓扑优化设计。通过平板结构优化算例验证适合此类工程问题的内力均匀性约束条件,采用全域粗网模型求解优化设计域、精细网格模型求解结构方案的二轮优化迭代的拓扑优化方法,得到最终优化结果。

## 1 冲压发动机安装结构简介

某冲压发动机安装系统采用了“前辅后主”的方案,保证发动机在整个飞行包线内可靠地定心、定位,合理地传递推力和各种附加载荷,同时满足发动机的热膨胀协调等<sup>[12]</sup>,发动机安装结构及坐标系定义见图2。

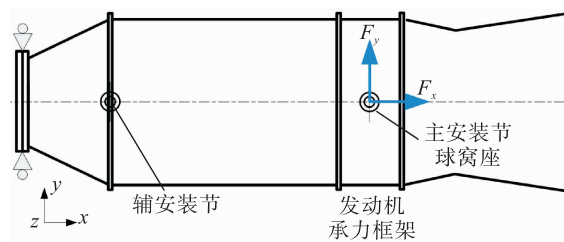


图2 发动机安装结构

Fig.2 Engine installation structure

参考文献[14],发动机安装系统承受的载荷需要从飞机的全任务剖面中各种机动惯性载荷、气动载荷和推力载荷的组合工况中寻找一组或多组最恶劣载荷工况。本文为了聚焦研究集中力扩散结构设计,对载荷工况进行了简化,从飞机任务剖面中挑选出一组典型恶劣工况进行研究,即单个主安装节受力  $F_x = 30 \text{ kN}$ ,  $F_y = 12 \text{ kN}$ ,  $F_z = 0 \text{ N}$ ,两个主安装节受力情况一致。在该工况发动机安装节附近结构处于等温状态,不考虑温度场的不均匀性,所有结构的工作温度为  $700^\circ\text{C}$ 。发动机薄壁承力结构和安装节的材料参数定义见表1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material property parameters

| 泊松比      | 弹性模量 $E/\text{GPa}$ |                      | 强度极限 $\sigma_b/\text{MPa}$ |                      |
|----------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| $\gamma$ | 20 $^\circ\text{C}$ | 700 $^\circ\text{C}$ | 20 $^\circ\text{C}$        | 700 $^\circ\text{C}$ |
| 0.3      | 215                 | 199                  | 905                        | 620                  |

## 2 集中力扩散结构工程设计方法<sup>[15]</sup>

传统的集中力扩散结构采用整体铣切放射肋结构(且放射肋互为对称),使集中力加快扩散。放射肋可以交会于板内或板外。本文研究的结构属于放射肋交会于板内的类型,结构形式及参数定义见图3。

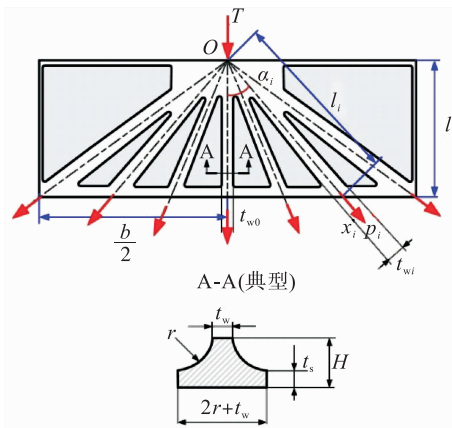


图 3 结构简图及参数定义

Fig. 3 Structure diagram and parameter definition

### 2.1 放射肋内力计算

因各放射肋的横截面积远大于壁板蒙皮的横截面积,故忽略蒙皮的承载能力,将放射肋短壳筒

化为集中一点的交会杆系进行设计<sup>[16]</sup>。由变形协调平衡条件可得

$$p_0 = \frac{T}{1 + \frac{2}{A_0} \sum_{i=1}^n A_i \cos^3 \alpha_i} \quad (1)$$

式中:  $T$  为集中力;  $p_0$  为中间肋的内力;  $A_0$  为中间肋的剖面积;  $i$  为一半结构的斜放射肋序号;  $n$  为一半结构的斜放射肋数量;  $A_i$  为第  $i$  根斜肋的剖面积;  $\alpha_i$  为第  $i$  根斜肋与中间肋的夹角。

第  $i$  根斜肋的内力  $p_i$  和应力  $\sigma$  的表达式为

$$p_i = \frac{p_0}{\cos \alpha_i} = p_0 \frac{A_i}{A_0} \cos^2 \alpha_i \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sigma_0 \cos^4 \alpha_i \quad (3)$$

式中  $\sigma_0$  为中间肋的应力。

### 2.2 放射肋结构设计

中间肋的剖面积为

$$A_0 = t_{w0}(r + t_s) + 2rt_s + 0.429r^2 \quad (4)$$

式中:  $t_{w0}$  为中间肋的宽度;  $r$  为铣切圆角(对机械铣可忽略不计);  $t_s$  为铣切壁板蒙皮厚度。

斜肋的剖面积为

$$A_i = \frac{A_0}{\cos^3 \alpha_i} \quad (5)$$

斜肋宽度  $t_{wi}$  与中间肋宽度  $t_{w0}$  的关系为

$$t_{wi} = \frac{t_{w0}}{\cos^3 \alpha_i} + \frac{r(2t_s + 0.429r)}{r + t_s} \left( \frac{1}{\cos^3 \alpha_i} - 1 \right) \quad (6)$$

在结构设计允许的情况下,在集中力传递到放射肋之前设计小过渡段,有利于集中力扩散。

### 2.3 放射肋圆筒壳稳定性计算

设放射肋两端固支,通过考虑放射肋的弯曲应变能,用能量法近似计算总承载能力。 $p_{lj}$  为总的临界失稳内力,表达式为

$$p_{lj} = m(2n + 1)p_{0lj}\xi\eta \quad (7)$$

式中:  $p_{0lj}$  为中间肋的临界失稳内力;  $m$  为放射肋平(曲)板个数;  $\xi$  为试验修正系数,取值 0.8;  $\eta$  反映了边界条件及放射肋螺旋影响。

$$p_{0lj} = \frac{7.89\pi^2 EJ_0}{l^2} \quad (8)$$

式中:  $E$  为材料弹性模量;  $J_0$  为中间肋截面惯性矩;  $l$  为放射肋板宽度(见图3)。

## 3 集中力扩散结构拓扑优化方法及验证

### 3.1 拓扑优化设计方法

集中力扩散结构的拓扑优化需要同时考虑承

载和均匀分散集中载荷的设计要求。采用应力约束下的连续体拓扑优化来求解,存在以下问题<sup>[17-18]</sup>:①结构求解域内每一个单元都有应力约束,优化问题约束多,敏度计算量大,迭代求解慢;②中间密度单元的应力和强度极限难以确定。本文采用连接截面内的节点内力的均匀程度来评价集中力扩散的效果,考虑到拓扑结构的不确定性,很难预先计算出节点内力的绝对值,因此采用节点力的方差算术平方和做为评价准则,即从算法上约束了连接截面内的节点内力的平均分布。

拓扑优化数学模型:以限定材料用量(体积约束)和连接截面的内力均匀性为约束,以连接件和支撑件组成的结构系统的最小柔度(结构的应变能,可以认为是结构刚度的倒数)为目标,寻找材料在连接件域内的最优分布。

$$\begin{aligned} \text{find} \quad & \rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \\ \text{min} \quad & C = \sum_{i=1}^s a_i U^T K U \\ & \sum_{j=1}^m (f_j - \bar{f})^2 / m \leq c^* \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{k=1}^n \rho_k v_k \leq V^* \\ & 0 \leq \rho_k \leq 1 \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\rho, \rho_k$  为模型单元的伪密度;  $n$  为模型单元的数量;  $C$  为多工况下柔度加权平均值;  $s$  为载荷工况总数;  $a_i$  为第  $i$  个工况的权重;  $U$  为位移向量;  $K$  为结构总刚度矩阵;  $m$  为边界上的节点数;  $f_j$  为边界上第  $j$  个节点的内力;  $\bar{f}$  为边界上节点力的均值;  $c^*$  为边界节点力方差约束上限;  $v_k$  为单元的体积;  $V^*$  为模型的体积约束上限。

本文采用的结构拓扑优化方法为变密度法(即 SIMP<sup>[19]</sup>法),为避免在优化过程中出现棋盘格现象、中间密度单元等问题<sup>[20]</sup>,导致计算不能得到清晰的拓扑构型,需要采用过滤算法策略<sup>[21]</sup>进行抑制。在结构拓扑优化过程中需要重点关注3个方面。

1) 边界节点的范围根据扩散结构实际情况确定。

2) 连接截面内节点内力的均匀性准则主要针对集中载荷的作用线方向的节点力分量数值均匀化程度进行评定。

3) 有限元建模时的网格尺度必须确保小于等于集中力扩散结构最小尺寸的  $1/3$ 。在实际设计过程中,可以先根据工程经验判断结构最小尺寸,然后通过多轮计算对比来确定计算网格尺度是否合适。

### 3.2 平板结构优化算例验证

通过平板结构优化算例验证适合集中力扩散结构的内力均匀性约束条件。已知平板结构面积为  $320 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ , 厚度为  $1 \text{ mm}$ , 设计域与非设计域定义见图4。平板上端边中心加载竖直向下集中力  $F = 100 \text{ N}$ , 下端固支。平板材料属性定义为弹性模量  $E = 1 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ 。设计域体积约束为小于等于  $35\%$ 。设计域与非设计域交界面上的节点做为考察节点, 采用节点竖直方向上力的方差算术平方和做为内力均匀性评价指标,  $c^*$  的取值不同对应的拓扑优化结果见图5。

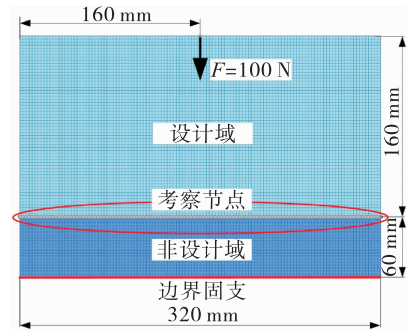


图4 平板结构及有限元模型

Fig. 4 Plane structure and finite element model

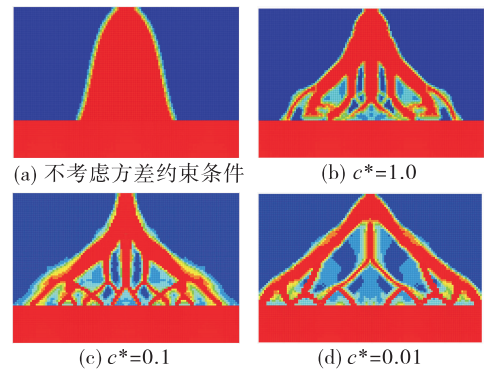


图5 不同方差约束下的优化结果对比

Fig. 5 Optimization results under different variance constraints

从图5的计算结果可以看出,当不考虑内力均



匀性评价约束时,材料分布集中于中央区域,设计结果的刚度大但不利于集中载荷的分散传递;当考虑内力均匀性评价约束时,随着方差约束  $c^*$  取值的减小,方差约束条件越来越严格,材料的分布趋势逐渐变均匀,设计方案具备的集中载荷分散效果越来越好。

## 4 主安装节承力结构拓扑优化

基于 OptiStruct 软件<sup>[22]</sup>开展发动机主安装节承力结构的有限元建模及拓扑优化设计。使用壳单元构建蒙皮结构,体单元构建发动机承力框架结构。考虑到边界条件对称、载荷对称和结构对称的特点,建模时只取结构的 1/2 建立模型。如果把整个承力框架做为设计域进行建模,采用 3 mm 的网格尺度,整个模型的网格总数为 70 880 个,采用 1 mm 的网格尺度,整个模型的网格总数为 1 266 894 个。为了保证集中力扩散结构的求解精度,需要按照 1 mm 的网格尺度建模,整个模型的网格数量太大导致拓扑优化的求解代价高,费时长。为了解决这一问题,本文采用了二轮优化迭代的设计思路。

首先按照 3 mm 的网格尺度,把整个承力框架做为设计域进行建模[见图 6(a)],通过体积比为约束,结构最小柔度为目标开展第一轮的结构拓扑优化,求解材料在空间中的最佳分布以缩小设计域,计算结果见图 6(b)。第一轮的优化的体积比约束应大于集中力扩散结构质量约束换算值的 3~5 倍,主要是确保在缩小设计域的同时,为第二轮优化留下足够的求解空间,避免粗网格模型求解时“丢失”细小传力路径造成得到错误的设计域。

根据第一轮优化结果和集中力扩散边界来确定优化设计域,进行重新建模,按照 1 mm 的网格尺度对设计域划分网格,新的优化模型[见图 7(a)]的网格总数为 89 330 个,网格数量大幅下降,精度满足要求,求解效率显著提升。将图 6(b)力的方差算术平方和做为集中力扩散截面的内力均匀性约束条件,同时考虑体积比为约束(此时的体积比通过集中力扩散结构的质量约束进行换算),以结构最小柔度为目标开展第二轮的结构拓扑优化,最终的拓扑优化结果见图 7(b)。

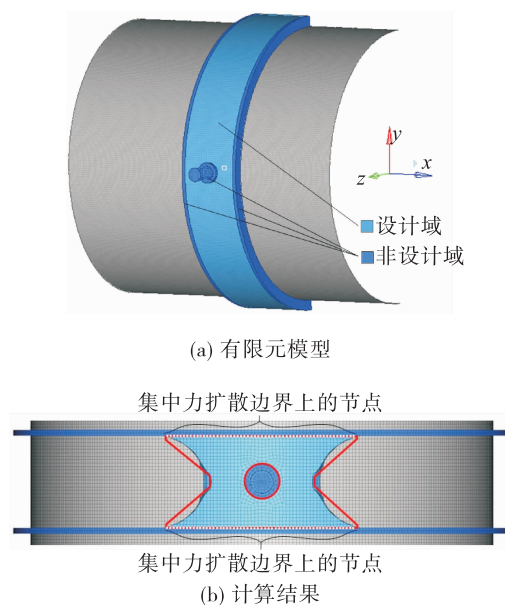


图 6 第一轮拓扑优化有限元模型和计算结果  
Fig. 6 Finite element model and optimization results in the first round

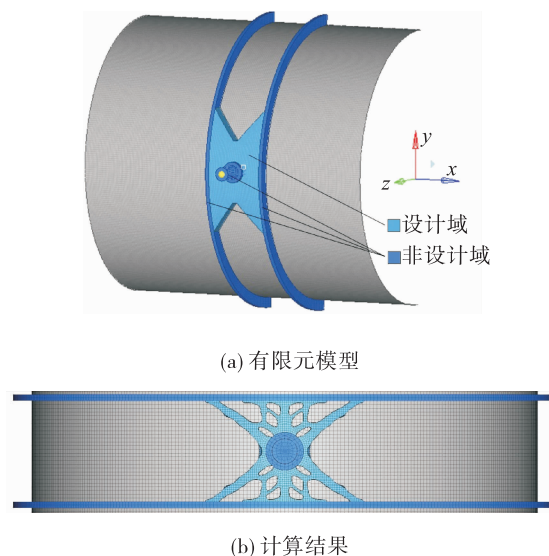


图 7 第二轮拓扑优化有限元模型和计算结果  
Fig. 7 Finite element model and optimization results in the second round

## 5 工程法设计方案和拓扑优化方案对比

针对本文提出的冲压发动机主安装节承力结构(简化算例)开展集中力扩散结构设计。根据第 1 节典型恶劣工况的载荷考虑了 3 种工况:工况 1 ( $F_x = 30$  kN)、工况 2 ( $F_y = 12$  kN)、工况 3 (同时 2 方向载荷)。使用工程设计方法设计放射肋结构方案,通过结构拓扑优化方法得到拓扑优化

设计方案。2 种方案在不同工况下的应力计算结果对比见图 8,在不同工况下安装节处最大位移、结构最大应力和结构质量对比见表 2。

从计算结果对比可见,结构拓扑优化方案对比放射肋方案:结构质量减轻 2.6 %,对应最大载荷(工况 3)的结构最大变形量减少 4.4 %,对应最大载

荷的结构最大应力减少 10 %。因此,结构拓扑优化方案在结构质量与放射肋方案基本相当的情况下,结构刚度和强度指标更优。从 2 种方案的 Mises 应力计算结果可知结构拓扑优化方案的应力分布更均匀,可以证明结构拓扑优化方案的集中力扩散效果更好。

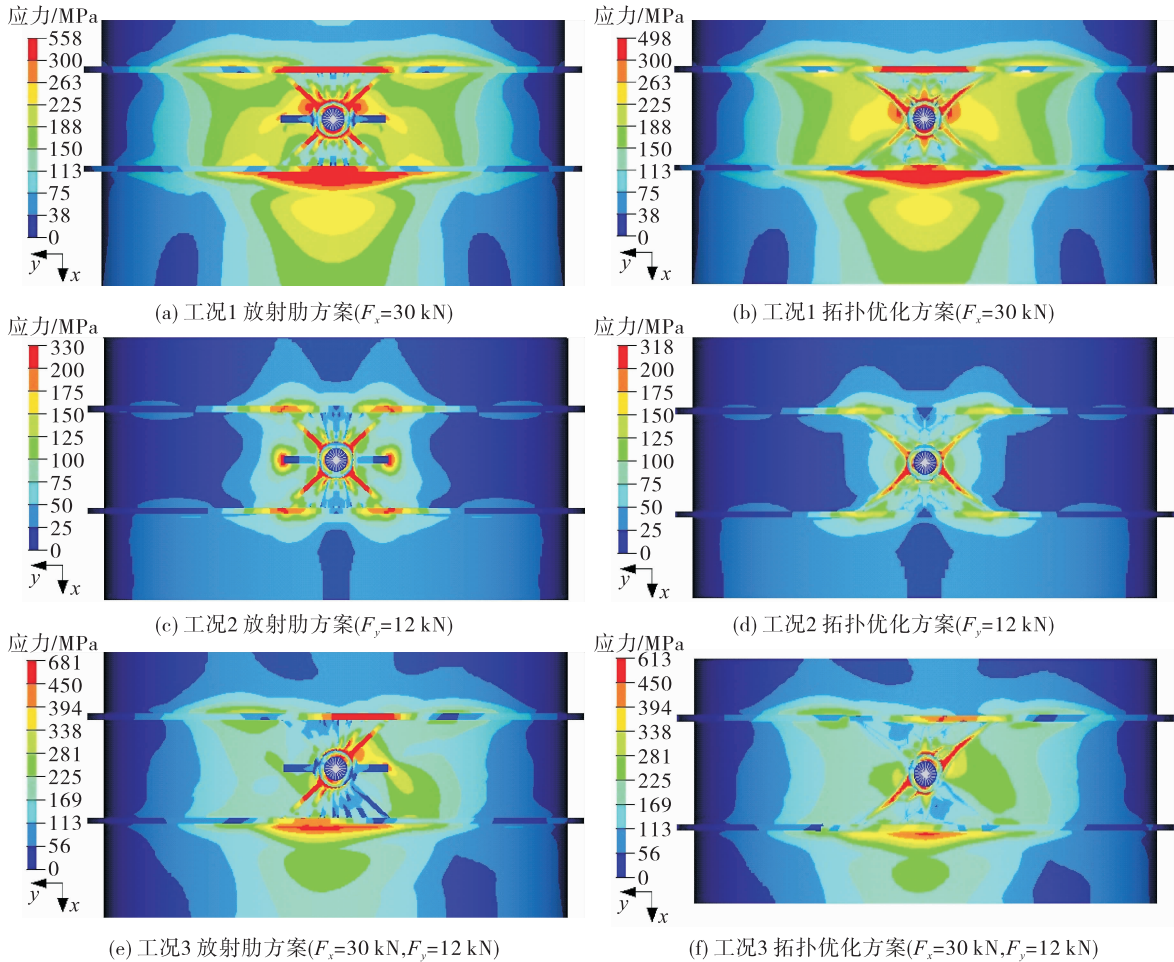


图 8 应力计算结果对比

Fig. 8 Comparison of stress calculation results

| 表 2 计算结果对比                               |          |             |              |             |
|--|----------|-------------|--------------|-------------|
| Tab. 2 Comparison of calculation results |          |             |              |             |
| 结构<br>方案                                 | 工况<br>名称 | 最大位移/<br>mm | 最大应力/<br>MPa | 结构<br>质量/kg |
| 放射肋<br>方案                                | 工况 1     | 0.748       | 558          | 0.732       |
|  | 工况 2     | 0.421       | 330          |             |
|  | 工况 3     | 1.240       | 681          |             |
| 拓扑优化<br>方案                               | 工况 1     | 0.709       | 498          | 0.713       |
|  | 工况 2     | 0.383       | 318          |             |
|  | 工况 3     | 1.185       | 613          |             |

6 结论

1) 针对冲压发动机主安装节承力结构开展集中力扩散结构优化设计,结构拓扑优化方案对比放射肋方案:结构质量减轻 2.6 %;对应 3 个工况,结构最大变形量减少 4.4 %~9.0 %,最大应力减少 3.6 %~10.8 %,其中对应最大载荷(工况 3)的结构最大变形量减少 4.4 %,最大应力减少 10 %;集中力扩散效果更好。拓扑优化方法更适合处理多方向、多工况载荷的集中力扩散结构工程问题。

2)在集中力扩散结构拓扑优化设计中,内力均匀性约束条件影响结构的集中力扩散效果。采用节点力的方差算术平方和做为评价约束条件,算法易实现,计算效率高,工程应用效果好。

3)针对求解域不明确的拓扑优化问题,采用全域粗网格模型求解优化设计域、精细网格模型求解结构方案的二轮优化迭代法,可以在确保求解精度和准确性的前提下,大幅度提高优化迭代的求解效率。

#### 参考文献:

- [1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册(第13册): 动力装置系统设计[M]. 北京:航空工业出版社,2006.
- [2] 李健,刘莹,田静,等. 军用小涵道比发动机的飞发安装连接研究[J]. 航空发动机,2015,41(5):81-85.
- [3] 刘亚军,刘道庆. 浅析现代战斗机发动机安装连接形式[J]. 飞机设计,2010,30(5):27-30.
- [4] ROZVANY G I N, GOLLUB W. Michell layouts for various combinations of line supports(I)[J]. International Journal of Mechanical Sciences,1990,32(12):1021-1043.
- [5] ROZVANY G I N, GOLLUB W, ZHOU M. Exact Michell layouts for various combinations of line supports(II)[J]. Structural Optimization,1997,14(2):138-149.
- [6] LEWIS T, ROZVANY G I N. Exact analytical solutions for some popular benchmark problems in topology optimization II; Three-sided polygonal supports[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2007,33(4):337-349.
- [7] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. Computers & Structures,1993,49(5):885-896.
- [8] SETHIAN J A, WIEGMANN A. Structural boundary design via level set and immersed interface methods[J]. Journal of Computational Physics,2000,163(2):489-528.
- [9] 张晓颖,李林生,吴会强,等. 薄壁贮箱集中力扩散研究[J]. 强度与环境,2016,43(5):38-44.
- [10] 梅勇,冯韶伟,雷勇军,等. 捆绑联接舱段集中力扩散结构优化设计[J]. 机械设计与制造,2016(3):200-203.
- [11] 牛飞,王博,程耿东. 基于拓扑优化技术的集中力扩散结构设计[J]. 力学学报,2012,44(3):528-536.
- [12] 张家鑫,王博,牛飞,等. 分级型放射肋短壳结构集中力扩散优化设计[J]. 计算力学学报,2014,31(2):141-148.
- [13] 张家鑫. 集中力扩散结构的优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [14] 田静,邱明星,李健,等. 带推力矢量的高推比发动机安装系统技术研究[J]. 航空发动机,2012,38(2):23-26.
- [15] 《导弹结构强度计算手册》编写组. 导弹结构强度计算手册[M]. 北京:国防工业出版社,1978.
- [16] 王心清. 结构设计[M]. 北京:宇航出版社,1994.
- [17] CHENG G D, JIANG Z. Study on topology optimization with stress constraints[J]. Engineering Optimization,1992,20(2):129-148.
- [18] LE C, NORATO J, BRUNS T, et al. Stress-based topology optimization for continua[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2010,41(4):605-620.
- [19] 何芝,雷阳,封硕,等. 基于 SIMP 法的变刚度结构拓扑优化研究[J]. 装备制造技术,2020(1):8-14.
- [20] SIGMUND O, PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,1998,16(1):68-75.
- [21] XU S L, CAI Y W, CHENG G D. Volume preserving non-linear density filter based on Heaviside functions[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2010,41(4):495-505.
- [22] 洪清泉,赵康,张攀. OptiStrucs & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2013.