

# 动态载荷下的喷管运动结构拓扑优化设计探讨

石 波, 黄雪刚, 周 杰, 付莉莉, 樊根民  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**基于等效静态载荷法(ESL)的设计思想,针对可调喷管在复杂动态力热载荷下的结构优化问题,提出通过刚体动力学仿真提取动态力载荷,按照运动过程分离成多个工况,将动态载荷下的结构优化问题转化成静态载荷下的多工况联合结构优化问题,简化了问题的求解难度。通过这种方法对喷管运动结构开展拓扑优化得到改进结构,开展多工况力热载荷仿真修改模型,迭代获得最终优化方案。优化结构对应各个工况最大位移减少 22% ~ 34%,最大应力减少 10% ~ 15%,结构质量减少 24%。设计方法的有效性得到验证,为动态力热载荷下的结构优化探索出实用的设计方法。

**关键词:**吸气式发动机;可调喷管;动态载荷;拓扑优化

**中图分类号:**V432      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2021)05-0042-07

## Discussion on topology optimal design of nozzle motion structure under dynamic load

SHI Bo, HUANG Xuegang, ZHOU Jie, FU Lili, FAN Genmin  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to optimize the variable nozzle motion structure under the complex dynamic force and variable thermal load, a new design method was proposed based on the idea of Equivalent Static Load (ESL). Firstly, the dynamic force load was extracted by rigid dynamics simulation, and then several working conditions were separated according to the motion process. In this way, the structure optimization under the dynamic load was transformed into the joint structure optimization under several static loads. The difficulty of solving problem was simplified. The topology optimization of nozzle motion structure was carried out with this method. The optimal structure was modified based on the calculation of strength and stiffness for multiple working conditions under force and thermal load. The final optimized structure was obtained by design iteration. The results show that the maximum displacement of the improved structure is reduced by 22% to 34%, the maximum stress is reduced by 10% to 15%, the weight is reduced by 24%. The effectiveness of the method has been proved, which provides a practical design method for structure optimization under dynamic force and variable thermal load.

**Keywords:** air breathing engine; variable nozzle; dynamic load; topology optimization

收稿日期:2020-12-24;修回日期:2021-01-15

基金项目:国家自然科学基金(11702205)

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。

## 0 引言

可调收敛-扩张喷管是吸气式发动机的关键结构件,可以保证发动机获得高的推力特性和性能<sup>[1-2]</sup>。喷管设计应以高性能为目标,并对结构重量、复杂性、可靠性、维修性及成本予以综合考虑<sup>[3]</sup>。可调喷管是一种在恶劣力热条件下工作的复杂机构部件,针对其结构开展轻量化减重工作时,仅仅采用单一工况下的线性静态载荷的结构优化结果往往无法满足实际工况,因此需要在整个运动周期内的动态载荷下开展结构优化工作。

动态载荷下的结构优化问题属于动态结构优化<sup>[4]</sup>设计领域中结构动力响应优化设计的研究内容,是以在动载荷激励下结构的响应的物理量(如位移、速度、加速度、应力和应变等)为目标或约束条件的结构动力学优化设计。动态结构优化存在设计灵敏度分析困难和动态约束难以处理的困难<sup>[5]</sup>,与之对比,静态结构优化因为具备多工况处理更高效、设计灵敏度易计算、优化算法完善等优点<sup>[6-7]</sup>,其理论和工程实践更为完善和成熟。学者们开展了把静态结构优化的优点运用到动态结构优化中的可行性研究<sup>[8-9]</sup>,提出使用等效静态载荷法<sup>[10]</sup>(ESL,即将动态载荷转换为一组等效静态载荷集),使用等效静态载荷集产生的静态响应完成结构在动态载荷作用下的优化设计,孙焕纯等在同一时期开展了类似研究<sup>[11]</sup>。随后,等效静态载荷法广泛应用于动态结构优化领域,毛虎平等将基于模态叠加的所有节点等效静态载荷法应用到动态响应优化中<sup>[12]</sup>;芮强等提出不同动态响应下等效静态载荷计算公式和结构动态优化流程,并对曲柄连杆机构开展优化设计<sup>[13]</sup>;刘宇等开展平衡吊臂架系统部件构型的动态拓扑优化<sup>[14]</sup>。

目前求解动态载荷下的结构优化的主要思路是利用等效静态载荷法在进行柔性多体动力学分析时,将动态载荷转化为等效静态载荷开展结构优化设计<sup>[15]</sup>。用这种方法求解复杂动态力热载荷下的喷管运动结构优化问题时,遇到了两个问题:①针对复杂运动副(例如点-线副,或线-线副)的刚柔耦合或全柔体动力学仿真的柔体边界条件定义困难,转成接触设置后由于引入非线性边界条件使动力学求解需要占用大量计算资源,导致优化计算

效率太低;②柔性多体动力学分析时变化的温度场引起的热应力载荷无法加载。

为解决上述问题,本文基于等效静态载荷法<sup>[16]</sup>的设计思想,提出通过刚体动力学仿真提取动态载荷,按照运动过程分离成多个工况,将动态载荷下的结构优化转化成静态载荷下的多工况联合结构优化。对拓扑优化得到的结构在力热工况下开展仿真计算,根据结果进行模型修改,通过设计迭代得到满足多工况下强度和刚度指标的优化方案。以某可调喷管调节片支撑结构为案例,验证方法有效性。

## 1 等效静态载荷技术

在动态载荷的作用下,结构表现最明显的一个特征就是动态载荷造成的位移。使用等效静态载荷替代运动结构所受动态载荷,必须保证引入的静态载荷使物体在受该静态载荷作用下变形的位移场与其在承受某一动态载荷时的位移场相同,形成位移场等效,如图1所示。

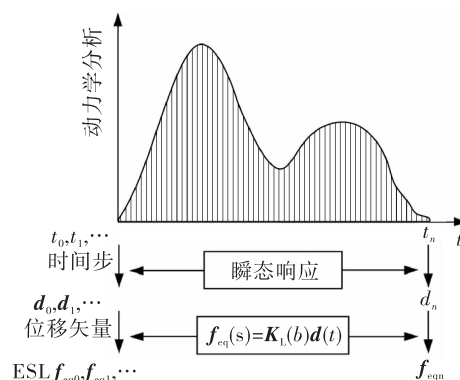


图1 静态载荷等效过程

Fig. 1 Static load equivalent process

在不考虑阻尼的情况下,动态载荷作用下结构的运动微分方程为

$$\mathbf{M}(b)\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}(b)\mathbf{y}(t) = \mathbf{r}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}(b)$ 为质量矩阵; $\mathbf{K}(b)$ 为刚度矩阵; $\mathbf{y}(t)$ 为位移; $\mathbf{r}(t)$ 为结构所受外力; $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ 为加速度。

根据有限元理论,在结构线性静态分析中存在如下表达式

$$\mathbf{f}_{eq} = \mathbf{K}(b)\mathbf{y} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}_{eq}$ 为等效静态载荷; $\mathbf{y}$ 为静态位移矢量。

根据位移场等效原理,静态载荷为

$$f_{eq} = K(b)y(t) = r(t) - M(b)\ddot{y}(t) \quad (3)$$

根据式(2)~(3)可以看出,等效静态载荷可以由外力和结构的惯性力求出。当等效静态载荷作为外力施加于结构线性静态优化中时,静态线性的位移场响应与动态非线性的位移场响应相同。应力通过节点位移计算得到,因此,相同的位移场也会产生相同的应力场。

## 2 可调喷管调节片支撑结构设计

### 2.1 结构简介

单环调节收敛-扩张喷管结构的调节片运动机构由收敛调节片、扩张调节片、连杆组成连杆机构,在作动筒的驱动下对喉道面积和出口面积进行调节,结构示意图如图2所示。

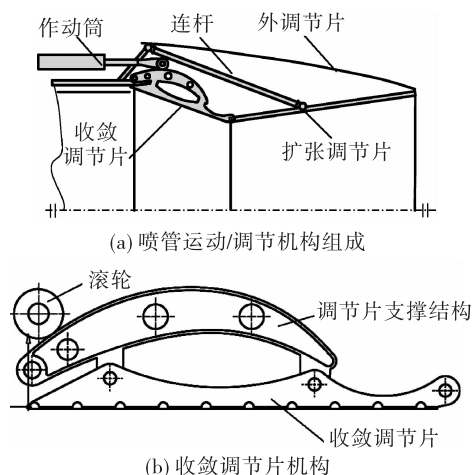


图2 喷管调节机构示意图

Fig. 2 Nozzle adjusting mechanism diagram

当作动筒推动作动环上的滚轮向前运动,滚轮压迫收敛调节片的支撑结构上的斜面使得支撑结构和收敛调节片围绕转轴向下转动,喷管喉道开始收缩;反之,作动筒向后收缩,收敛调节片在内流道燃气的气动力作用下围绕转轴向上转动,喷管喉道开始扩张。本文只研究收敛调节片机构在从扩张-收敛的单方向运动周期内的动态载荷下的结构优化问题。

### 2.2 收敛调节片机构载荷分析

喷管调节片内表面承受高温燃气气动力,背面由作动机构支撑实现力平衡。采用CFD方法开展喷管流场仿真计算,得到的喷管调节片压力分布见图3。

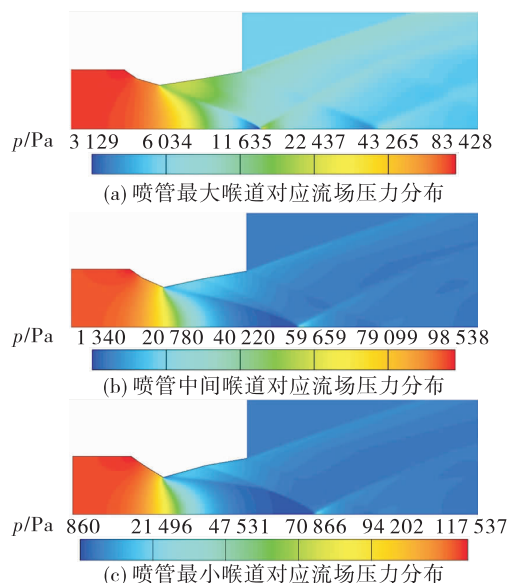


图3 喷管流场压力分布

Fig. 3 Pressure distribution in nozzle flow field

在喷管调节片从最大喉道运动到最小喉道的范围( $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ )内,按照收敛调节片每运动 $\Delta\theta$ 角度构成一种流道状态,将喷管流道状态离散成多个流道状态,进行流场分析,获得对应不同 $\theta$ 角的喷管流场延程压力分布。将计算出来的压力分布数据进行公式拟合,可以得到收敛调节片在不同工位下(不同的喉道位置)的压力分布的数学公式(4),用于在有限元软件中设置压力分布情况。

$$p = f(\theta, x) \quad (4)$$

式中: $p$ 为收敛调节片上的压力,Pa; $\theta$ 为收敛调节片的角度, $^{\circ}$ ; $x$ 为调节片轴向位置,mm。

温度载荷通过试验中获得的实测数据(调节片背面和支撑结构上的温度测点数据),经稳态传热计算获得温度场数据,用于后续的热应力计算。喷管调节片机构的温度分布范围为 $600 \sim 910^{\circ}\text{C}$ 。

参考等效静态载荷技术,开展刚体动力学分析提取动态力载荷。将收敛调节片与大地坐标设置为旋转副,滚轮由平移副和旋转副驱动,滚轮与收敛调节片支撑结构上的斜面之间的运动副定义“线-线”副,对收敛调节片施加燃气压力分布载荷。通过刚体动力学仿真,提取动态载荷。然后将作动筒行程分成10份形成10个工况(见图4),每个工况的载荷使用刚体动力学仿真计算的载荷。最后在多工况载荷和约束条件下开展结构拓扑优化设计。

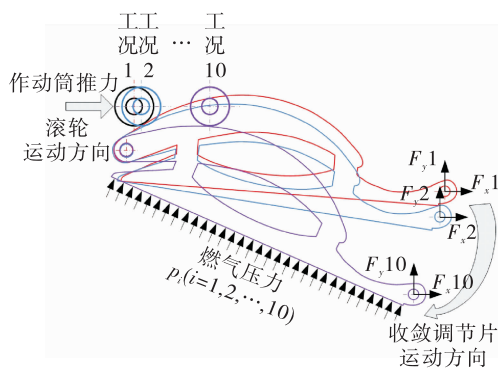


图 4 收敛调节片载荷示意图

Fig. 4 Loads of convergent flap

### 2.3 材料参数

收敛调节片机构(含支撑结构、收敛调节片等)的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material property parameter

泊松比	弹性模量 $E$ / GPa			线变形系数 $\alpha$ / (°C) <sup>-1</sup>	
$\gamma$	20 °C	850 °C	950 °C	850 °C	950 °C
0.305	200	143.5	133.2	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.612 \times 10^{-5}$

## 3 喷管调节片支撑结构拓扑优化

### 3.1 拓扑优化数学模型

本文采用的结构拓扑优化方法为变密度法(即 SIMP<sup>[17]</sup>法),优化计算采用 Hyperworks 平台下的 Optistruct 软件<sup>[18]</sup>进行建模和计算。

在恶劣的力热载荷工况下,调节片机构的结构刚度直接影响到喷管的性能<sup>[19]</sup>,调节片机构的应力水平决定了结构的强度和疲劳寿命<sup>[20]</sup>。求解满足刚度和强度指标下的最小结构质量,建立拓扑优化数学模型

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n]^T \in D \\
 & \text{minMass}(\boldsymbol{\rho}) \\
 & \text{s. t. } \begin{cases} \text{Dis}_{\max}^i \leq [\text{Dis}]_i & i = (1, 2, \dots, 10) \\ \sigma_{\max}^i \leq [\sigma] & i = (1, 2, \dots, 10) \end{cases} \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中: $\boldsymbol{\rho}$  为变密度法定义的单元相对密度矢量; $\text{Mass}(\boldsymbol{\rho})$  为结构质量; $\text{Dis}_{\max}^i$  为各工况下结构的最大位移,代表结构刚度水平; $[\text{Dis}]_i$  为各工况下结构的最大位移的允许值; $\sigma_{\max}^i$  为各工况下结构的最大

大应力; $[\sigma]$  为结构许用应力。

### 3.2 几何建模和优化设计域定义

根据可调喷管收敛调节片支撑结构原方案构建几何模型,考虑到支撑结构安装需要和载荷加载要求,将支撑结构的几何模型分成设计结构区域和非设计结构区域两个部分,如图 5 所示。由于收敛调节片机构为对称结构且载荷对称,因此只建立 1/2 计算模型。

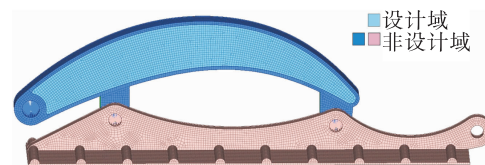


图 5 拓扑优化模型

Fig. 5 Topological optimization model

本文主要研究调节片支撑结构优化问题,将收敛调节片只作为传力结构,不作为优化对象。有限元模型由 92 492 个六面体单元构成,其中网格平均大小为 1 mm。

### 3.3 拓扑优化结果

为了证明多工况约束条件下的拓扑优化结果的正确性和合理性,将单一工况下的优化结果与多工况下的优化结果对比,如图 6 所示。

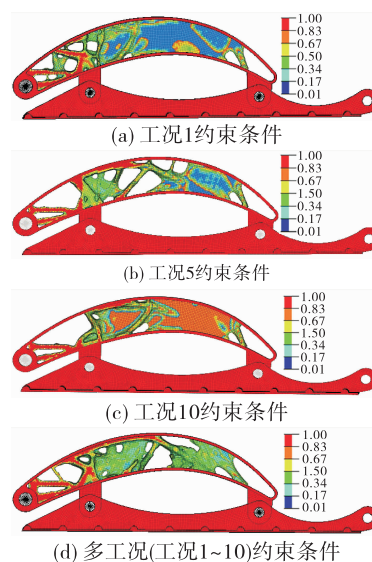


图 6 拓扑优化计算结果

Fig. 6 Topology optimization calculation results

从优化结果来看,单一工况下的优化结果只能保证机构运动的某个时刻时结构的传力模型满足



刚度和强度指标下达到最优,而多工况下的优化结果可以保证机构运动的整个周期内的各个时刻下的结构传力模型满足刚度和强度指标下达到最优。

3.4 拓扑优化结果模型重构

拓扑优化计算结果是单元密度不同的网格数据,存在不光滑、不连续和不清晰的情况。使用多边形造型拟合方法对计算结果进行曲面拟合,将结果导出到 UG 软件中开展模型重构,得到工程上可行的加强筋结构优化方案,如图 7 所示。

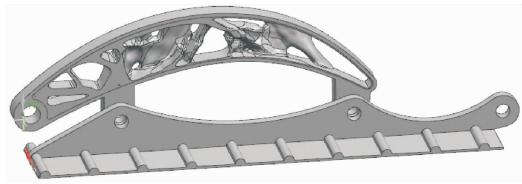


图 7 拓扑优化计算结果的模型重构  
Fig. 7 Remodel of topology optimization results

3.5 力热载荷下修改完善优化设计方案

对拓扑优化得到的结构在力热工况下开展仿真计算,根据计算结果对 3.4 节得到重构模型进行修改,通过设计迭代得到满足多工况力热载荷下强度和刚度指标的优化方案。

4 优化结果对比

将收敛调节片支撑结构原方案与最终优化设计得到的结构方案在各工况下开展对比计算,方案性能对比如表 2 和图 8 所示,位移和应力云图如图 9 所示(由于工况较多,只列出工况 1、工况 5 和工况 10 的结果)。

对比原方案,优化设计方案对应各个工况最大位移减少 22% ~ 34%,刚度更大;最大应力减少 10% ~ 15%,结构上的应力分布更均匀,平均应力水平更低;结构质量减少 24%。

表 2 方案性能对比  
Tab. 2 Performance comparison of different schemes

项目	工况 1		工况 2		工况 3	
	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力
原方案	2.372 mm	675 MPa	2.378 mm	673 MPa	2.383 mm	671 MPa
优化方案	1.556 mm	591 MPa	1.671 mm	603 MPa	1.692 mm	594 MPa
对比	-34%	-12%	-30%	-10%	-29%	-11%

项目	工况 4		工况 5		工况 6	
	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力
原方案	2.411 mm	684 MPa	2.436 mm	679 MPa	2.552 mm	660 MPa
优化方案	1.791 mm	612 MPa	1.891 mm	576 MPa	1.851 mm	586 MPa
对比	-26%	-11%	-22%	-15%	-27%	-11%

项目	工况 7		工况 8		工况 9	
	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力	最大位移	最大应力
原方案	2.544 mm	672 MPa	2.558 mm	681 MPa	2.561 mm	689 MPa
优化方案	1.881 mm	594 MPa	1.896 mm	614 MPa	1.952 mm	605 MPa
对比	-26%	-12%	-26%	-10%	-24%	-12%

项目	工况 10		支撑结构重量
	最大位移	最大应力	
原方案	2.567 mm	697 MPa	0.331 kg
优化方案	1.988 mm	617 MPa	0.252 kg
对比	-23%	-11%	-24%

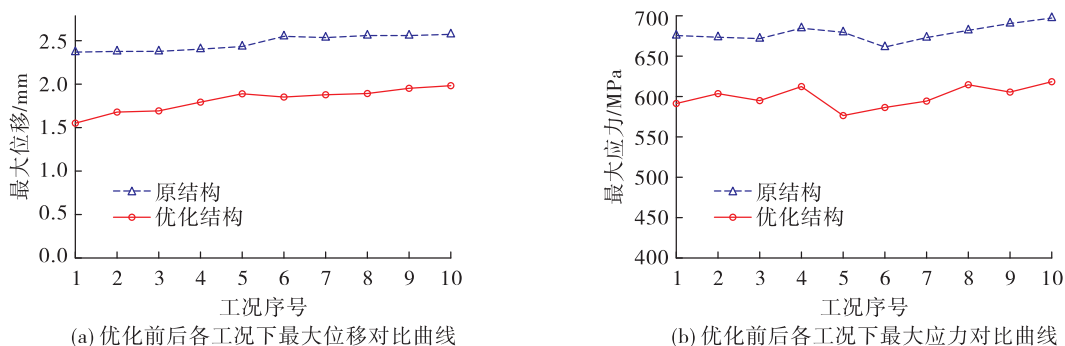


图8 方案性能对比曲线

Fig. 8 Scheme performance comparison curve

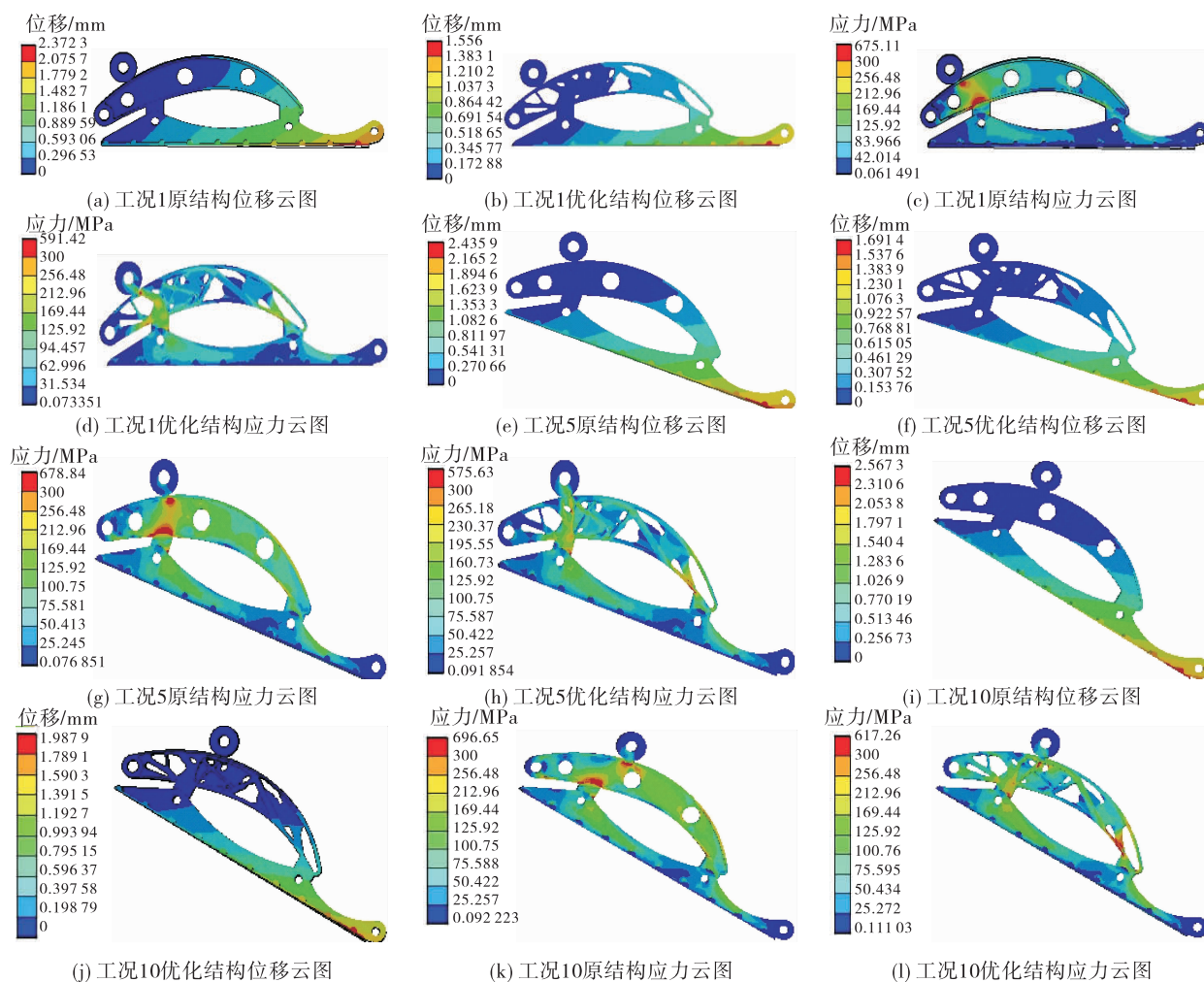


图9 位移和应力云图

Fig. 9 Displacement and stress distribution nephogram

## 5 结论

本文基于等效静态载荷法的设计思想,将动态力热载荷下的结构优化问题转化成静态载荷下

的多工况联合结构优化问题,降低了问题求解难度,提出了复杂运动副机构动态力热载荷下的结构优化工程解决方法。优化方案在结构减重 24% 的情况下,在各工况力热载荷下的强度刚度指标

均优于原方案,最大应力减少 10% ~ 15%,最大位移减少 22% ~ 34%。设计方法的有效性得到验证。

#### 参考文献:

- [1] 易仕和,赵玉新,何霖. 超声速与高超声速喷管设计[M]. 北京:国防工业出版社,2013.
- [2] 梁俊龙,吴宝元,李斌. 几何结构可调的亚燃冲压发动机性能研究[J]. 火箭推进,2010,36(2):1-4.
- LIANG J L, WU B Y, LI B. Performance research of adjustable geometric structure ramjet engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 36(2):1-4.
- [3] 刘大响. 航空发动机设计手册:进排气装置(第7册)[M]. 北京:航空工业出版社,2000.
- [4] 陈建军,车建文,崔明涛,等. 结构动力优化设计述评与展望[J]. 力学进展,2001,31(2):181-192.
- [5] TSENG C H, ARORA J S. Optimum design of systems for dynamics and controls using sequential quadratic programming[J]. AIAA Journal, 1989, 27(12):1793-1800.
- [6] KANG B S, CHOI W S, PARK G J. Structural optimization under equivalent static loads transformed from dynamic loads based on displacement[J]. Computers & Structures, 2001, 79(2):145-154.
- [7] CHOI W S, PARK G J. Structural optimization using equivalent static loads at all time intervals[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(19/20):2105-2122.
- [8] VANDERPLAATS G N. Thirty years of modern structural optimization[J]. Advances in Engineering Software, 1993, 16(2):81-88.
- [9] BARTHELEMY J F M, HAFTKA R T. Approximation concepts for optimum structural design—a review[J]. Structural Optimization, 1993, 5(3):129-144.
- [10] CHOI W S, PARK G J. Transformation of dynamic loads into equivalent static loads based on modal analysis[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46:29-43.
- [11] 孙焕纯,石连栓,柴山. 考虑动应力、动位移约束的离散变量结构优化设计[J]. 计算力学学报, 1997, 14: 723-726.
- [12] 毛虎平,董小瑞,郭保全,等. 面向所有节点等效静态载荷的模式叠加法的结构动态响应优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(9):1759-1766.
- [13] 芮强,王红岩,田洪刚. 基于等效静态载荷法的结构动态优化[J]. 汽车工程, 2014, 36(1):61-65.
- [14] 刘宇,朱成章,尹剑,等. 基于等效静态载荷法的平衡吊臂架结构优化[J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(2): 159-164.
- [15] 陆佑方. 柔性多体系统动力学[M]. 北京:高等教育出版社,1996.
- [16] 李修峰,王亚斌,王晨. MotionView&MotionSolve 应用技巧与实例分析[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [17] 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.
- [18] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [19] 张卫红,章胜冬,高彤. 薄壁结构的加筋布局优化设计[J]. 航空学报, 2009, 30(11):2126-2131.
- [20] 刘双燕,涂玉倩,苗应刚,等. 筋的截面形状对薄壁结构振动疲劳性能的影响[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 190-198.