

# 基于折衷规划法的航发齿轮传动壳体结构-热柔度协同拓扑优化

黄昊<sup>1</sup> 王曾<sup>2</sup> 李波<sup>2</sup> 卢泽华<sup>1</sup> 刘怀举<sup>1\*</sup>

1.重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室,重庆,400044

2.中国航发四川燃气涡轮研究院,成都,610500

**摘要:** 齿轮传动机匣是航空发动机的核心组件,常面临极端恶劣的服役环境和轻量化的设计需求。目前的机匣壳体结构设计依赖工程经验,难以满足航空发动机的高功率密度设计需求。基于折衷规划法提出一种考虑热传导性能的壳体多目标拓扑优化方法,以轴承孔错位量和优化区域的体积分数为约束条件开展拓扑优化,实现了壳体减重 6.1%,最大 von Mises 应力减小 5.2%,最高温度降低 2.3%,轴承孔中心错位量减小 9.3%。

**关键词:** 航空发动机; 齿轮传动壳体; 热传导; 拓扑优化

**中图分类号:** V233.14

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.009

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Structure-thermal Compliance Collaborative Topology Optimization of Aero-engine Gears Transmission Case Based on Compromise Programming Method

HUANG Hao<sup>1</sup> WANG Zeng<sup>2</sup> LI Bo<sup>2</sup> LU Zehua<sup>1</sup> LIU Huaiju<sup>1\*</sup>

1.State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment,Chongqing University,Chongqing,400044

2.AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment,Chengdu,610500

**Abstract:** Gear transmission case, an important component in aero-engined, endured severe operational conditions and necessitated lightweight construction amidst stringent design prerequisites. The existing structural design of the gear transmission cases, which mainly depended on engineering experience, struggles to satisfy the high power density design requirements of aero-engines. Based on the compromise programming method, a multi-objective topology optimization method was proposed for the cases considering the heat conduction performance. By imposing constraints on the central misalignment of bearing holes and the volume fraction of the optimization domain, the proposed strategy facilitated topology optimization. The resultant design achieves a 6.1% decrease in case weights, accompanied by reductions of 5.2% in peak von Mises stress, 2.3% in maximum temperature and a significant improvement of 9.3% in the central misalignment of bearing holes.

**Key words:** aero-engine; gear transmission case; heat conduction; topology optimization

### 0 引言

齿轮传动机匣是航空发动机的重要组成部分之一,承担为各类机械系统提供动力的重任,在高温、重载和大惯性的恶劣服役环境下,不断提高机匣的轻量化程度是当下的主要发展趋势之一<sup>[1-2]</sup>。壳体是机匣的重要组成部分,质量超过整个机匣的 1/4,其轻量化程度显著影响整个机匣的功率密度。现有的壳体设计严重依赖工程经验。轴承孔错位量是机匣的一项重要评价指标,如何在保

证机匣错位量的前提下提高壳体轻量化水平成为亟待解决的技术难题。

结构轻量化设计方法已广泛用于航空航天等领域<sup>[3]</sup>,主要包括应用轻质材料<sup>[4]</sup>和结构优化<sup>[5]</sup>。钛合金、铝合金、镁合金等轻质材料逐步取代钢而在航空航天领域占据主导地位,极大提高了航空航天装备的轻量化程度。结构优化方面,拓扑优化取得显著成效<sup>[6]</sup>。拓扑优化以固体各向同性惩罚法(SIMP)<sup>[7]</sup>、均匀化法<sup>[8]</sup>、水平集法<sup>[9]</sup>、渐进结构优化法(ESO)<sup>[10-11]</sup>为代表,相比于其他几种方法,基于 SIMP 法的连续体拓扑优化应用更广<sup>[6]</sup>。

对航空装备结构件的轻量化研究中,针对机

收稿日期:2024-06-07

基金项目:重庆市杰出青年科学基金(CSTB2023NSCQ-JQX0016)

翼开展的拓扑优化在实现减重的同时改善了机翼的服役性能<sup>[12-14]</sup>。闫浩等<sup>[15]</sup>对航空发动机涡轮盘径向截面开展拓扑优化,揭示了单辐板涡轮盘与双辐板涡轮盘的联系及演化规律。WARWICK 等<sup>[3]</sup>以飞机舱壁一阶固有频率最大为目标进行拓扑优化,改善了舱壁的振动声学特性。孟亮等<sup>[16]</sup>以航空发动机支架的柔顺度为目标函数开展拓扑优化,在减重 15% 的同时,刚度、一阶固有频率分别提高 20% 和 15%。车辆、工程机械和新能源领域齿轮箱壳体的拓扑优化得到广泛应用,研究人员通过优化壳体加强筋布置减小壁面的法向振动加速度,使齿轮箱减振获得较好的效果<sup>[17-18]</sup>。KIM 等<sup>[19]</sup>以齿轮箱声压级最小为目标函数,结合结构-声学耦合分析,优化了壳体肋板结构和布局,实现辐射噪声的下降。上述研究仅考虑机械载荷对拓扑优化的影响,不适用于航发齿轮传动壳体的拓扑优化。

HAN 等<sup>[20]</sup>讨论了惯性载荷下连续体结构的拓扑优化,发现固定外力较小时,惯性载荷对拓扑结构有较大影响,且会改变目标函数的大小和变化趋势。牛草等<sup>[21]</sup>探究了惯性过载对车载导弹发射架的影响。MOGHADASI 等<sup>[22]</sup>提出一种改进的梯度近似方法,可在较低的计算成本下改善具有高惯性载荷问题的优化结果。JI 等<sup>[23]</sup>提出一种非均匀产热拓扑方法,以锂离子电池冷板的最大传热为优化目标,提升了冷板的综合性能。SUN 等<sup>[24]</sup>提出一种基于有序 SIMP 的共轭传热双固体拓扑优化方法,利用不同材料的热导率差异开发高性能复合材料冷板。惯性载荷主要分为加速度产生的惯性过载和向心加速度产生的离心力<sup>[20]</sup>,而惯性过载对航发齿轮传动壳体的优化分析存在显著影响<sup>[25]</sup>。航发齿轮传动系统转速高、受载大,轴承在高速旋转时会产生大量的热。目前在齿轮箱拓扑优化领域,兼顾机械、惯性、热载荷对壳体影响的研究较少。

本文针对“机械-惯性-热”载荷作用下航发齿轮传动壳体轻量化带来的挑战,采用折衷规划法将壳体的结构柔度和热柔度归一化,定义综合优化目标函数,以轴承孔中心错位量和优化区域的体积分数为约束条件,提出复杂载荷下考虑壳体散热性能的航发齿轮传动壳体多目标拓扑优化模型。首先根据空间大小、传动链布局、加工装配性等完成机匣初始方案结构设计,并明确载荷边界。然后,对机匣进行数值分析,提取关键评价指标,构建拓扑优化目标函数。最后对壳体进行拓扑优化,并根据优化云图重新设计壳体结构。

## 1 结构与工况

某航发的齿轮传动机匣由主壳体、壳体盖、轴承座等零件组成,如图 1a 所示。传动机匣整体采取剖分式结构,壳体铸造成形。润滑油通过供油口流入,沿内部油路喷射至各齿轮副、轴承和花键,以延长服役寿命。图 1b 所示为机匣的附件位置。输出端 I~III 安装的附件依次为滑油泵、回油泵和离心增压泵,它们的质量分别为 15.5 kg、10.0 kg 和 7.0 kg,质心与对应轴承座的距离分别为 140 mm、120 mm 和 80 mm。主壳体与壳体盖的材料均为 ZL101A(屈服强度为 246 MPa),其余零件材料为 7075 铝合金,具体材料参数如表 1 所示。

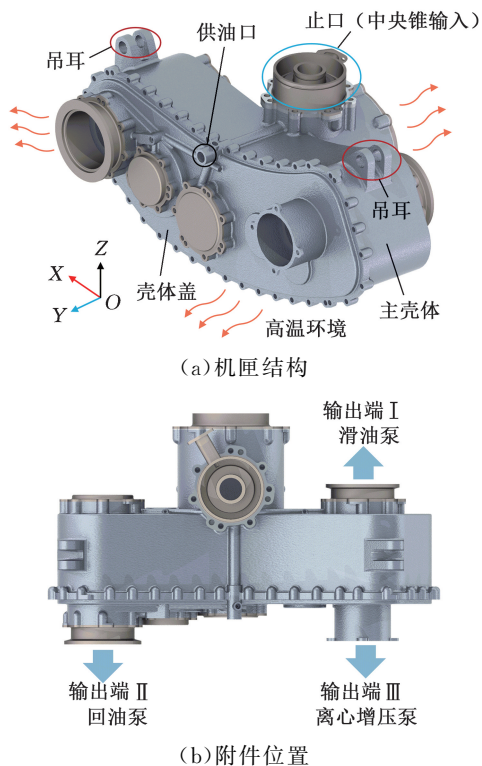


图 1 航发齿轮传动壳体初始结构  
Fig.1 Initial structure of aero-engine gear transmission case

表 1 壳体材料物性参数

Tab.1 Physical parameters of case material

材料	ZL101A	7075
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	2680	2810
弹性模量/GPa	65	62
泊松比	0.33	0.33
热膨胀系数/( $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ )	24	24
热导率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	155	142
比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}^{-1}$ )	889	921

航空飞行器在爬升、俯冲或突然变向时产生惯性载荷,附件在惯性作用下会产生较大的弯矩,对壳体变形具有显著影响。机匣工作存在连续运

转、最大功率、慢车等多种工况,高压转子将转矩传递给各安装附件,输出端 II 的最大瞬态提取功率为 180 kW,比稳态提取功率大 80 kW,因此机匣瞬态运行工况对壳体强度和刚度的要求更高,故在瞬态运行工况下开展壳体的分析与优化。机座坐标系 Z 向为止口轴线方向,Y 向为吊耳安装孔轴线方向,X 轴垂直于 YOZ 平面。表 2 所示为机匣瞬态运行下的工况参数。飞行器在该工况下做机动动作时,X 向、Y 向和 Z 向的最大惯性过载加速度分别为 6 g、3 g 和 -14 g。

表 2 航发齿轮传动机匣工况参数

Tab.2 Working condition parameters of aero-engine gear transmission case

输出端	扭矩/(N·m)	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
I	72.6	10 516
II	49.5	34 643
III	32.1	5959

## 2 数值分析方法

为提高数值分析的计算效率,去除较小的结构过渡圆角和内部油孔等对分析影响不大的几何特征,建立机匣的有限元模型,以获得机匣初始方案的关键评价参数。图 2a 所示为机匣的有限元模型,网格选取二阶实体四面体单元,网格单元最大尺寸取 8 mm,局部结构过渡处的网格单元最小尺寸取 2 mm,网格总数为 280 万。约束两侧吊挂 X、Y 和 Z 方向的平动自由度,约束止口外圆柱面 Y 和 Z 方向的平动自由度。如图 2b 所示,为提高数值计算效率,将附件简化为质量点单元,施加到对应的附件质心处,并通过梁单元与轴承座端面建立关联关系,模拟惯性过载情况下产生的弯矩对壳体的影响。各零件由 RBE2 单元相连接,并利用 RBE3 单元耦合各轴承孔的内孔面,以施加轴承静载荷。

航发齿轮传动机匣工作时常面临高温、重载和大惯性的极端服役工况,主要承受齿轮副啮合产生的作用力、惯性过载下附件产生的弯矩、热载荷,通过求解传动系统轴系的平衡方程可计算出各轴承孔的载荷。图 2c 所示为各轴承孔受载情况。输出端 I 的瞬态功率较大,附近轴承孔的载荷较其余部位大。

机匣的稳态热分析环境温度定为 120 °C,壳体与外界环境对流传热系数取 50 W/(m<sup>2</sup>·K)。轴承产热按 1 : 2 : 1 的比例分别作用于内圈滚道、滚子壁面和外圈滚道<sup>[26]</sup>,本文将外圈滚道热量作为输入施加到各轴承孔内壁面。根据 Palmgren 提出的轴承功率损失计算模型确定轴

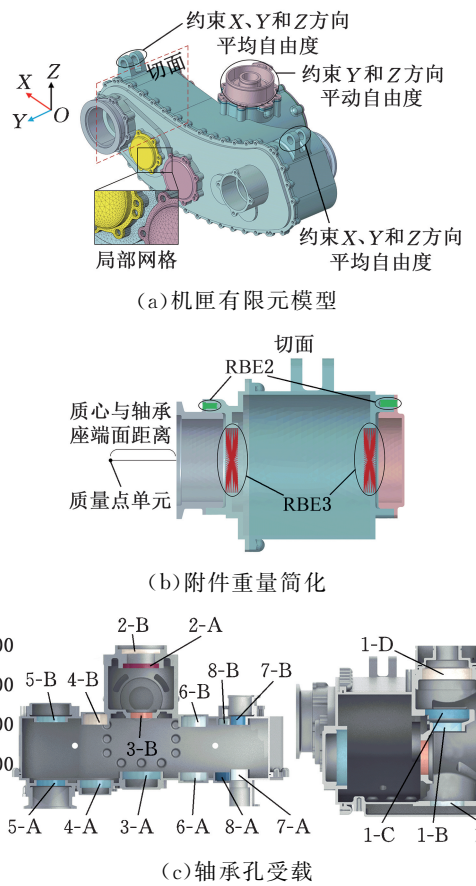


图 2 机匣有限元模型及轴承孔受载情况  
Fig.2 Case finite element model and bearing hole load condition

承生热量。PALMGREN<sup>[27]</sup> 将轴承的摩擦力矩分为负载产生的摩擦力矩和润滑油黏度引起的摩擦力矩。轴承功率损失计算公式为

$$N = 1.047 \times 10^{-4} (M_1 + M_V) n_b \quad (1)$$

$$M_1 = f_1 F_\beta d_m$$

$$M_V = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (\nu n_b)^{2/3} d_m^3 & \nu n_b > 2000 \\ 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3 & \nu n_b \leq 2000 \end{cases}$$

式中: N 为轴承总摩擦功率损失, kW; M<sub>1</sub> 为外载引起的摩擦力矩, N·m; M<sub>V</sub> 为黏性摩擦力矩, N·m; n<sub>b</sub> 为轴承转速, r/min; f<sub>1</sub> 为与轴承结构及相对负荷有关的因子; F<sub>β</sub> 为轴承的当量动载荷, N; d<sub>m</sub> 为轴承节圆直径, mm; f<sub>0</sub> 为与轴承类型和润滑方式有关的因子, 对于深沟球轴承, f<sub>0</sub> = 3.5; ν 为润滑油运动黏度, mm<sup>2</sup>/s。

计算得到各轴承孔的功率损失如表 3 所示,最大的功率损失位于轴承孔 3-A 处,轴承孔 8-A 和 8-B 的功率损失相对较小。

## 3 拓扑优化方法

提出了机械-惯性-热载荷作用下的航发齿轮传动壳体拓扑优化方法,将壳体的结构柔度和热柔度作为优化目标函数,以轴承孔中心错位量和优化区域的体积分数为约束条件,开展壳体拓扑优化,在实现减重的同时提高壳体刚度和散热性

表 3 轴承功率损失

Tab.3 Bearing power loss

轴承编号	功率损失/ (mW/mm <sup>3</sup> )	轴承编号	功率损失/ (mW/mm <sup>3</sup> )
1-A	1.4	1-B	0.9
1-C	1.5	1-D	1.9
2-A	3.3	2-B	2.5
3-A	1.9	3-B	1.5
4-A	2.4	4-B	1.5
5-A	2.5	5-B	1.0
6-A	0.7	6-B	0.9
7-A	0.6	7-B	0.4
8-A	0.1	8-B	0.2

能,减小壳体轴承孔中心的错位量。图 3 所示为壳体拓扑优化流程。首先建立机匣的有限元模型,划分优化设计区域。然后拓扑优化壳体的结构柔度和热柔度,将结构柔度与热柔度的最大值和最小值作为优化目标函数的中间参数。最后,基于折衷规划法将结构柔度和热柔度综合,构建拓扑优化目标函数,开展壳体拓扑优化。

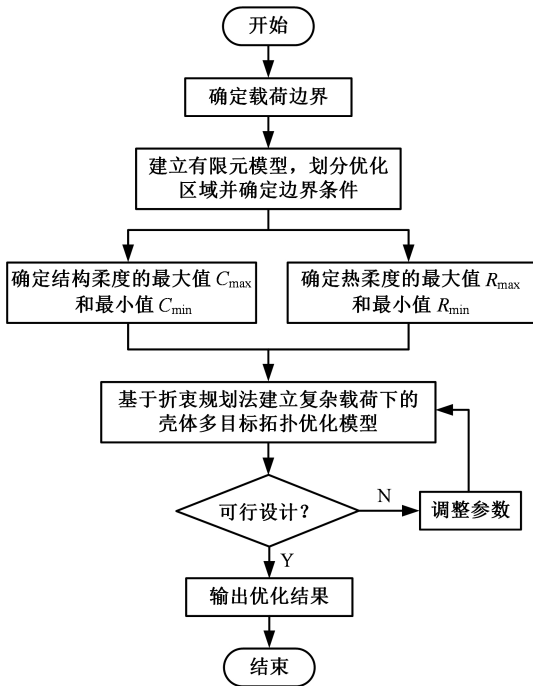


图 3 壳体拓扑优化流程

Fig.3 Case topology optimization flow

拓扑优化前,定义约束条件和优化区域。图 4a 所示为优化模型的铸造约束设置。为确保优化结果的可加工性,本文设置参考节点 1 到参考节点 2 方向的双向拔模约束(Y 向)。将壳体内壁(蓝色区域)作为优化区域,如图 4b 所示。图 4c 所示为错位量约束条件。壳体发生变形会影响轴承孔中心的错位量,导致啮合精度下降,故在优化过程中将错位量作为约束条件。为避免优化过程中产生材料堆积和棋盘格现象,采用最大和最小网格尺寸约束来提高优化迭代的收敛性<sup>[28]</sup>。设

置网格最大尺寸为 25 mm,网格最小尺寸为 12 mm,以减小中间密度单元的比例,获得可提供设计指导的拓扑优化结果。

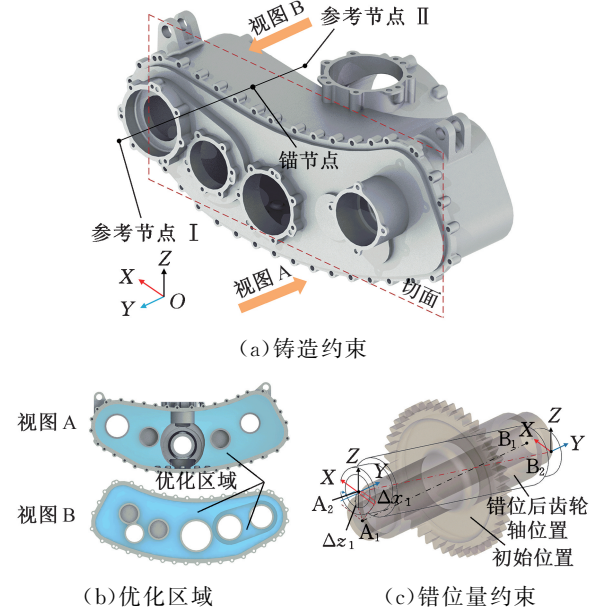


图 4 航发齿轮传动壳体拓扑优化区域及约束条件  
Fig.4 Topology optimization region and constraint conditions of aero-engine gear transmission case

以实体网格单元相对密度  $\rho$  为优化目标,单元相对密度与材料弹性模量之间的关系为<sup>[29]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \text{find } \rho &= (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N) \in \mathbf{R}^N \\ \text{s.t. } E(\rho_e) &= E_{\min} + \rho_e^p (E_0 - E_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $N$  为有限元单元的数量; $\mathbf{R}^N$  为  $N$  维设计空间; $E(\rho_e)$  为单元的弹性模量; $\rho_e$  为第  $e$  个单元的相对密度; $p$  为惩罚因子,取决于材料的泊松比<sup>[7]</sup>, $p = 2$ ;  $E_0$  为材料的初始弹性模量; $E_{\min}$  为空洞材料的弹性模量。

基于折衷规划法建立复杂载荷下的航发齿轮传动壳体多目标拓扑优化模型,以获得刚度大、散热好的壳体结构。结构刚度一般转化为结构柔度  $C$ ,而热柔度  $R$  通常作为热优化的目标函数<sup>[30-31]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} C(\rho) &= \mathbf{F}^T \mathbf{U} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N \rho_e^p \mathbf{u}_e \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \\ R &= \int_{\Omega} Q T d\Omega + \int_{\Gamma_N} q T d\Gamma + \int_{\Gamma_R} h (T_{\infty} - T) d\Gamma \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}$  为结构所受外部载荷; $\mathbf{U}$  为结构位移场; $\mathbf{K}$  为结构刚度矩阵; $\mathbf{u}_e$  为单元位移; $\mathbf{k}_0$  为单元的初始刚度; $Q$  为体热源; $h$  为表面对流传热系数; $T_{\infty}$  为环境温度; $\Omega$  为设计域; $q$  为热通量; $\Gamma_N$  为 Neumann 边界条件的边界; $\Gamma_R$  为 Robin 边界条件的边界。

理想情况下,传动系统每根齿轮轴两端的轴承孔中心处于良好的对中状态,但在外部载荷的作用下,壳体发生变形,进而影响错位量大小,降低齿轮啮合精度,但只有 X 向、Z 向的分量会影响平行轴的错位量  $\Delta d(x, z)$ 。设齿轮轴两端的轴

承孔中心在 X 向的偏移量分别为  $\Delta x_1$  和  $\Delta x_2$ , 在 Z 向分别为  $\Delta z_1$  和  $\Delta z_2$ , 则错位量的计算公式为

$$\Delta d(x, z) = \sqrt{(\Delta x_1)^2 - (\Delta x_2)^2 + (\Delta z_1)^2 - (\Delta z_2)^2} \quad (4)$$

结构柔度和热柔度在数量级上存在差异, 线性加权法和法不适用于子目标函数数量级不同的多目标优化问题<sup>[32]</sup>, 故采用折衷规划法消除子目标函数之间数量级的差异, 将结构柔度与热柔度相结合, 构建优化目标函数  $F(\boldsymbol{\rho})$ , 以轴承孔中心错位量和优化区域的体积分数为约束条件, 开展壳体拓扑优化, 对应数学模型为

$$\begin{aligned} \min F(\boldsymbol{\rho}) = & \sqrt{\omega^2 \left( \frac{C(\boldsymbol{\rho}) - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \right)^\rho + (1 - \omega)^2 \left( \frac{R(\boldsymbol{\rho}) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \right)^\rho} \\ \text{s.t. } V = JV_0 \geq & \sum_{e=1}^N \rho_e v_e \\ \mathbf{KU} = & \mathbf{F} \\ \mathbf{WT} = & \mathbf{P} \\ \Delta d(x, z) \leq & 0.038 \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq & \rho_e \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为权重系数,  $\omega = 0.6$ ;  $C_{\max}$ 、 $C_{\min}$  分别为优化前后结构柔度的最大值和最小值;  $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$  分别为优化前后热柔度的最大值和最小值;  $\mathbf{W}$  为热传导系数矩阵;  $\mathbf{T}$  为结构的节点温度场;  $\mathbf{P}$  为热载荷矢量;  $J$  为体积分数;  $V_0$  为初始体积;  $v_e$  为单元  $e$  的体积;  $\rho_{\min}$  为设计变量允许采用的最小密度。

#### 4 壳体拓扑优化

图 5 所示分别为纯机械载荷及机械-惯性载荷作用下的力学分析结果。不考虑惯性时, 最大 von Mises 应力 32.2 MPa 位于轴承孔 3-B 附近的壳体结构过渡处, 最大变形量 51.6  $\mu\text{m}$  位于轴承孔 2-A 的内圆柱面, 出现上述现象的主因是轴承孔 2-A 和 3-B 承受的载荷相对较大。产生惯性过载时, 主壳体与滑油泵连接的安装座处附近存在明显的应力集中, 最大应力为 92.9 MPa, 最大变形 0.3076 mm 位于对应的轴承座端面, 这是因为滑油泵在机匣所有安装的附件中最重。综上所述, 惯性过载对航发齿轮传动壳体力学分析的影响十分显著, 是数值分析过程中的重要载荷边界。

图 6 所示为壳体初始方案在稳态热分析下的温度场, 轴承孔 3-A 和 4-A 附近温度较高, 出现热聚集, 且温度以它们为中心呈扩散状态, 最高温度为 148.7  $^{\circ}\text{C}$ 。表 4 所示为各齿轮轴两端轴承孔中心的错位量, 其中, 轴 IV 的错位量 43  $\mu\text{m}$  最大, 轴 II 处的错位量 12  $\mu\text{m}$  最小。输出端 I 的滑油

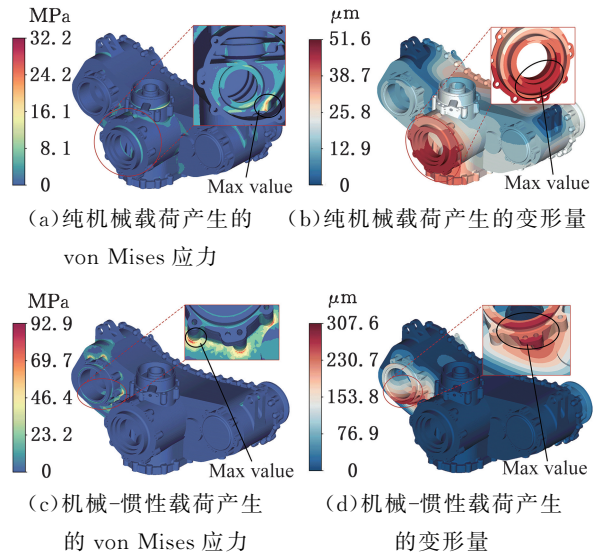


图 5 惯性过载对壳体应力和变形的影响  
Fig.5 Effect of inertial overload on stress and deformation of case

泵和输出端 III 的离心增压泵位于齿轮轴 VII 的两侧, 出现惯性过载时, 该区域附近的结构会产生一定的平衡作用, 导致轴 III ~ V 的错位量普遍大于轴 VI ~ VIII 的错位量。

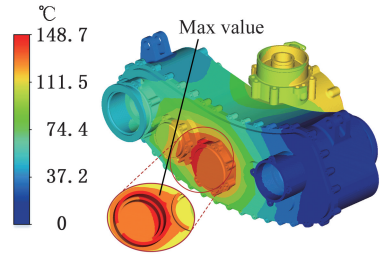


图 6 壳体初始方案的温度场分布  
Fig.6 The temperature field distribution of the initial scheme of the case

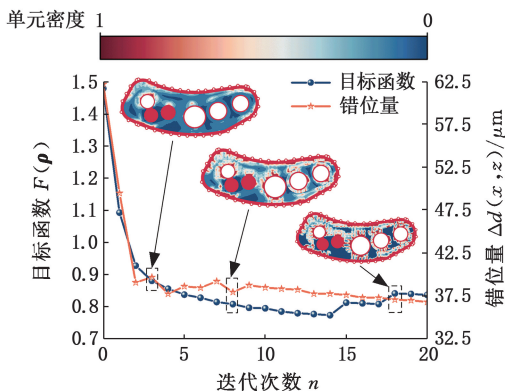
表 4 各轴承孔中心错位量

Tab.4 Misalignment of the center of each bearing hole

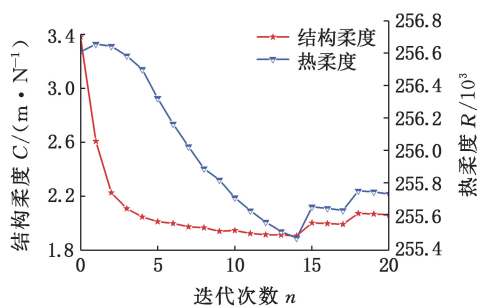
轴系	错位量	轴系	错位量
轴 I	30	轴 V	34
轴 II	12	轴 VI	29
轴 III	31	轴 VII	21
轴 IV	43	轴 VIII	33

基于折衷规划法将极端工况下的壳体结构柔度与热柔度相结合来构建优化目标函数, 以轴 IV 两端轴承孔中心错位量和优化区域的体积分数为约束条件, 开展壳体拓扑优化。如图 7 所示, 前 5 次迭代中, 目标函数、错位量和结构柔度迅速减小; 第 6 次迭代后, 目标函数、错位量和结构柔度分别在 0.8、38  $\mu\text{m}$  和 1950 N/mm 浮动, 并趋于稳定; 热柔度在 1~14 次迭代中先增大、后缓慢减小。为保证拓扑优化结果的合理性, 在优化过程

中额外设置网格尺寸约束以使惩罚因子  $p$  在优化迭代时调整<sup>[5]</sup>,故在 15 次迭代后发现目标函数  $F(\rho)$  和错位量有较小的波动。



(a) 目标函数和错位量曲线



(b) 结构柔度和热柔度曲线

图 7 拓扑优化目标及约束函数迭代曲线

Fig.7 Topology optimization objective and constraint function iterative curve

图 8 为航发齿轮传动壳体的拓扑优化云图,红色代表该区域起主要的承载和散热作用,发现 2 个分布特征:①为提高壳体的散热性能,优化后壳体的结构整体以各轴承孔为中心,呈往外扩散的状态;②由于惯性过载影响较大,壳体上外附件的轴承孔附近保留了更多的材料,以增强壳体的承载能力。

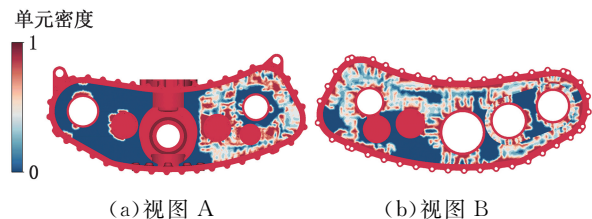


图 8 航发齿轮传动壳体拓扑优化云图

Fig.8 Topology optimization cloud diagram of aero-engine gear transmission case

### 5 初始方案与优化方案的对比

为保证壳体的可加工性,降低制造成本,合并图 8(优化云图)中不利于加工的红色区域,重新设计壳体结构。图 9 所示为根据优化云图重新设

计的壳体优化方案,其中壳体减薄区域的厚度由初始的 6 mm 减少为 2.5 mm。优化后,壳体质量由 14.9 kg 下降为 14.0 kg。

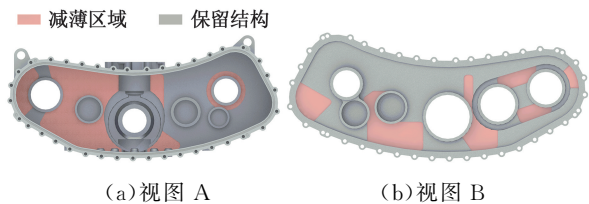


图 9 航发齿轮传动壳体优化方案  
Fig.9 Optimization scheme of aero-engine gear transmission case

为保证数值分析结果的可靠性,采取相同的网格尺寸对机匣进行网格划分,在相同的输入和边界条件下对机匣进行分析。由图 10 可知,优化后壳体整体的应力、变形和温度分布趋势不变,最大 von Mises 应力由 92.9 MPa 降低到 88.1 MPa,减小了 5.2%;最大变形量由 307.6 μm 降低到 298.6 μm,减小了 2.9%;最高温度由 148.7 °C 降低到 145.3 °C,减小了 2.3%;轴 IV 轴承孔中心错位量由 43 μm 降低到 39 μm,减小了 9.3%;轴承孔 3-A (D 区域)附近的温度场改善较为明显。拓扑优化后,壳体的应力分布更均匀,错位量更小,散热性更好。

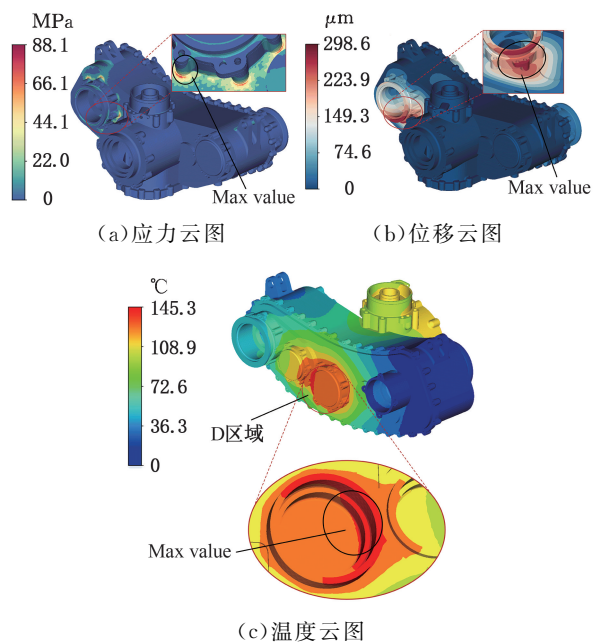


图 10 壳体优化方案的分析结果

Fig.10 The analysis results of case optimization scheme

### 6 结论

1)通过折衷规划法将结构柔度与热柔度相统一来构建优化目标函数,以轴承孔错位量和优化区域的体积分数作为约束条件,基于 SIMP 插值

惩罚模型建立了复杂载荷作用下的航发齿轮传动壳体多目标拓扑优化模型。

2) 机匣初始方案最大应力 92.9 MPa 和最大变形 307  $\mu\text{m}$  位于与滑油泵连接的安装座处, 轴承孔附近出现热聚集, 最高温度为 148.7  $^{\circ}\text{C}$ 。拓扑优化时, 为保证壳体刚度并提高壳体散热性能, 机匣安装有附件的轴承孔周围保留的材料较多。在轴承生热量较大的轴承孔周围, 材料呈以轴承孔为中心向外扩散的形式分布。

3) 壳体拓扑优化在实现减重 6.1% 的同时提高了整体刚度和散热性能, 最大 von Mises 应力减小 5.2%, 最高温度降低 2.3%, 轴承孔中心错位量减小了 9.3%, 达到优化效果。

#### 参考文献:

- [1] LUAN Xiaochi, LIU Gongmin, SHA Yundong, et al. Experiment Study on Traveling Wave Resonance of Fatigue Fracture of High-speed Bevel Gear in Aero-engine Based on Acoustic Measurement Method[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 511: 116345.
- [2] LU Zehua, CHEN Yiming, LIU Huaiju, et al. A High-power-density Design Method for Polymer Gear Systems via an Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III and Surrogate Sub-models[J]. *Materials & Design*, 2024, 240:112875.
- [3] WARWICK B T, MECHEFSKE C K, KIM I Y. Topology Optimization of a Pre-stiffened Aircraft Bulkhead[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 60(4):1667-1685.
- [4] FANG Jianguang, GAO Yunkai, SUN Guangyong, et al. Multiobjective Reliability-based Optimization for Design of a Vehicle Door[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 67:13-21.
- [5] FAN Weichun, XU Zhongming, WU Bi, et al. Structural Multi-objective Topology Optimization and Application Based on the Criteria Importance through Intercriteria Correlation Method[J]. *Engineering Optimization*, 2022, 54(5):830-846.
- [6] ZHU Jihong, ZHANG Weihong, XIA Liang. Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016, 23(4):595-622.
- [7] BENDSØE M P, SIGMUND O. Material Interpolation Schemes in Topology Optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69(9):635-654.
- [8] ALLAIRE G, GEOFFROY-DONDERS P, PANTZ O. Topology Optimization of Modulated and Oriented Periodic Microstructures by the Homogenization

Method[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2019, 78(7):2197-2229.

- [9] PICELLI R, TOWNSEND S, BRAMPTON C, et al. Stress-based Shape and Topology Optimization with the Level Set Method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2018, 329:1-23.
- [10] FAN Zhao, XIA Liang, LAI Wuxing, et al. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures with Stress Constraints[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59(2): 647-658.
- [11] 文永蓬, 郑晓明, 吴爱中等. 基于 BESO 算法的城市轨道车轮拓扑优化[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(10):191-199.  
WEN Yongpeng, ZHENG Xiaoming, WU Aizhong, et al. Topology Optimization of Urban Rail Wheel Based on BESO Algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(10):191-199.
- [12] GOMES P, PALACIOS R. Aerostructural Topology Optimization Using High Fidelity Modeling [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(5):137.
- [13] HØGHØJ L C, CONLAN-SMITH C, SIGMUND O, et al. Simultaneous Shape and Topology Optimization of Wings[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2023, 66(5):116.
- [14] FÉLIX L, GOMES A A, SULEMAN A. Topology Optimization of the Internal Structure of an Aircraft Wing Subjected to Self-weight Load[J]. *Engineering Optimization*, 2020, 52(7):1119-1135.
- [15] 闫浩, 吴晓明. 载荷敏感度抑制下涡轮盘拓扑优化及结构演化[J]. *航空学报*, 2022, 43(5):225295.  
YAN Hao, WU Xiaoming. Topology Optimization and Structure Evolution of Turbine Disks Based on Load Sensitivity Suppression[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(5):225295.
- [16] 孟亮, 仲明哲, 李文彪, 等. 面向增材制造的航空发动机外部系统支架拓扑优化设计[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(23):2822-2832.
- [17] MENG Liang, ZHONG Mingzhe, LI Wenbiao, et al. Topology Optimization Design of Aero-engine External System Brackets for Additive Manufacturing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(23):2822-2832.
- [17] QI Le, ZHOU Jianxing, JIN Pengcheng, et al. Low Noise Optimization of Two-stage Gearbox Housing Structure Based on Acoustic Contribution Analysis and Topology Optimization[J]. *Journal of*

- Mechanical Science and Technology, 2023, 37(9): 4533-44.
- [18] LIU Lan, KANG Kun, XI Yingjie, et al. Optimal Design and Experimental Verification of Low Radiation Noise of Gearbox[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(1):130.
- [19] KIM B S, HAN H W, CHUNG W J, et al. Optimization of Gearbox Housing Shape for Agricultural UTV Using Structural—Acoustic Coupled Analysis[J]. Scientific Reports, 2024, 14:4145.
- [20] HAN Yongsheng, XU Bin, WANG Qian, et al. Bi-directional Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures Subjected to Inertial Loads [J]. Advances in Engineering Software, 2021, 155:102897.
- [21] 牛草, 顾广鑫, 朱磊, 等. 车载导弹发射架结构有限元分析与拓扑优化设计[J]. 兵工学报, 2023, 44(2):437-451.
- NIU Cao, GU Guangxin, ZHU Lei, et al. Finite Element Structural Analysis and Topology Optimization of a Vehicle-borne Missile Launching Cradle [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(2):437-451.
- [22] MOGHADASI A, HELD A, SEIFRIED R. Topology Optimization of Members of Flexible Multi-body Systems under Dominant Inertia Loading[J]. Multibody System Dynamics, 2018, 42(4): 431-446.
- [23] JI Hengsong, LUO Tianbei, DAI Liming, et al. Topology Design of Cold Plates for Pouch Battery Thermal Management Considering Heat Distribution Characteristics [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 224:119940.
- [24] SUN Chen, WANG Wei, TIAN Xiwei, et al. Thermal Design of Composite Cold Plates by Topology Optimization [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 259:108594.
- [25] 高彤, 张卫红, 朱继宏. 惯性载荷作用下结构拓扑优化[J]. 力学学报, 2009, 41(4):530-541.
- GAO Tong, ZHANG Weihong, ZHU Jihong. Structural Topology Optimization under Inertial Loads[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, 41(4):530-541.
- [26] LU Fengxia, WANG Meng, PAN Wenbin, et al. CFD-based Investigation of Lubrication and Temperature Characteristics of an Intermediate Gearbox with Splash Lubrication[J]. Applied Sciences, 2021, 11(1):352.
- [27] PALMGREN A. Ball and Roller Bearing Engineering[M]. Place Philadelphia: SKF Industries Inc, 1959.
- [28] ZHANG Yue, SHAN Yingchun, LIU Xiandong, et al. An Integrated Multi-objective Topology Optimization Method for Automobile Wheels Made of Lightweight Materials[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 64(3):1585-1605.
- [29] GAO Xingjun, CHEN Weihua, LI Yingxiong, et al. Robust Topology Optimization of Multi-material Structures under Load Uncertainty Using the Alternating Active-phase Method [J]. Composite Structures, 2021, 270:114065.
- [30] SUN Guangyong, TAN Dongdong, LYU Xiaojiang, et al. Multi-objective Topology Optimization of a Vehicle Door Using Multiple Material Tailor-welded Blank (TWB) Technology[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 124:1-9.
- [31] YOON M, KOO B. Topology Design Optimization of Conductive Thermal Problems Subject to Design-dependent Load Using Density Gradients[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(5):1687814019850735.
- [32] 苏永雷, 张志飞. 车身多性能约束下的一体压铸三角梁轻量化设计[J]. 中国机械工程, 2024, 35(4):691-699.
- SU Yonglei, ZHANG Zhifei. Integrated Casting Triangular Beam Lightweight Improving with Multi-performance Constraints of Body Systems [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(4): 691-699.

(编辑 张 洋)

作者简介:黄 昊,男,2000年生,硕士研究生。研究方向为航发齿轮传动壳体轻量化方法研究。E-mail: haohuang\_cqu@163.com。刘怀举\* (通信作者),男,1986年生,教授,博士研究生导师。研究方向为机械传动创新设计与智能制造研究。E-mail: huaijuliu@cqu.edu.cn。

#### 本文引用格式:

黄昊,王曾,李波,等.基于折衷规划法的航发齿轮传动壳体结构-热柔度协同拓扑优化[J]. 中国机械工程,2025,36(7):1471-1478.

HUANG Hao, WANG Zeng, LI Bo, et al. Structure-thermal Compliance Collaborative Topology Optimization of Aero-engine Gears Transmission Case Based on Compromise Programming Method[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1471-1478.