

梁式管接头结构的稳健性优化设计

刘 勇¹, 任新江¹, 闫方超²

(1. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300;
2. 天津布尔科技有限公司, 天津 300392)

摘 要: 为了提高梁式管接头的密封性能, 以梁式管接头的结构参数为设计变量, 对其进行稳健性优化设计。首先建立了带有椭圆弧凹槽的梁式管接头的有限元模型; 其次分别以密封接触表面两道密封的最大接触压力和接触面宽为密封性能的定量指标, 建立 2 阶响应面模型, 利用遗传算法对响应面模型进行多目标优化求解; 最后在多目标优化模型上增加表征目标函数稳健性的灵敏度附加项, 求解得到了梁式管接头稳健的设计参数组合, 并通过有限元数值模拟验证了稳健性优化结果的有效性。结果表明: 当椭圆长半轴为 1.156 mm、椭圆短半轴为 0.315 mm、第 1 道密封名义宽度为 0.429 mm 时, 梁式管接头的密封稳健性更好, 稳健性设计达到预期目标。

关 键 词: 梁式管接头; 响应面模型; 遗传算法; 多目标优化; 稳健性设计
中图分类号: V232.7 **文献标志码:** A

Structural robust optimization design of beam seal

LIU Yong¹, REN Xinjiang¹, YAN Fangchao²

(1. College of Aeronautical Engineering,
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Tianjin Bool Technology Company Limited, Tianjin 300392, China)

Abstract: In order to improve the sealing performance of the beam seal, the structural parameters of the beam seal were used as design variables, and the robust optimization design was carried out. A finite element model of the beam seal with elliptical arc groove was established. Taking the maximum contact pressure and contact surface width of these two seals on the sealing contact surface as quantitative indicators of sealing performance, second-order response surface models were established, and the response surface models were solved by multi-objective optimization using genetic algorithm. The additional sensitivity term representing the robustness of the objective function was added to the multi-objective optimization model, and the robust design parameters combination of the beam seal was obtained. The effectiveness of the robust optimization results was verified by the finite element's numerical simulation. The results showed that when the elliptic semi-major axis was 1.156 mm, the elliptic semi-minor axis was 0.315 mm, and the nominal width of the first seal was 0.429 mm, the sealing robustness of the beam seal was better, and the robust design achieved the expected goal.

Keywords: beam seal; response surface model; genetic algorithm; multi-objective optimization; robust design

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2020KJ017)

作者简介: 刘勇(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度振动与可靠性研究。E-mail: liuyongyb@126.com

通信作者: 任新江(1996—), 男, 硕士生, 主要从事航空发动机结构强度与优化设计研究。E-mail: rxjzgmh66@163.com

引用格式: 刘勇, 任新江, 闫方超. 梁式管接头结构的稳健性优化设计[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220868. LIU Yong, REN Xinjiang, YAN Fangchao. Structural robust optimization design of beam seal[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220868.

航空液压管接头是航空器液压系统的基本组件之一,主要用于液压管路的连接和管内液压油的密封^[1]。管接头对液压系统的密封性能有着重要影响,据统计,90%以上的“跑、冒、滴、漏”问题是由于管接头密封性能不足导致的^[2-3]。目前我国主要采用锥形和球形密封结构,实践表明,当管内流体压力高于 22 MPa 时多次出现泄漏问题^[4],因此研发新式管接头变得更加迫切。

梁式管接头兴起于欧美,具有比我国现役管接头更加优良的性能,它允许在导管端部存在一定范围的安装角误差,除此之外,梁式管接头还具有自紧性,适用于 50 MPa 的高压流体管路,能满足液压管路对于管接头长寿命、高可靠性的要求。在现代美国航空器液压系统中,梁式管接头得到了广泛的应用^[1]。然而美国汽车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, SAE) 标准^[5-6]仅给出了阳接头的结构参数,对关键性的阴接头未给出具体的参数,这给我国参考研制梁式管接头带来了困难,至今为止,梁式管接头在我国仍然处于研制阶段,尚未得到大范围的推广应用。对于梁式管接头这种的管路连接型式,许多学者就其密封性能进行了研究, Kim 等^[7]通过改变梁的倾斜角和厚度来研究梁式管接头 U 型梁的几何形状对接触压力的影响,得到合适的倾斜角为 8.5°; 陈芝来^[2]分析了梁式管接头结构的优缺点,并对其进行了流场分析; 李晓东^[8]对影响梁式管接头密封性能的密封梁厚度和密封倾斜角进行了研究,给出了相应的取值范围; 田雨松^[9]研究了梁式管接头密封面粗糙度和温度变化对密封特性的影响; Shi、Salant 和 Yang 等^[10-12]在唇式 U 形垫圈处设计凹槽,使密封接触面上出现了第 2 道密封,提高了密封性能; 另外,崔颖等^[4]设计了一种带椭圆弧凹槽的梁式管接头,通过有限元数值模拟和试验证明了该结构可以形成两道密封,相较于只有一道密封面的管接头,其密封性能得到较大提升。

为了进一步提高梁式管接头的密封性能,可在现有研究的基础上,对其进行结构优化设计。在传统的结构优化设计模型中,设计变量是确定性的,没有考虑参数扰动如加工误差等对目标函数的影响,导致优化设计的最优解对设计变量的扰动非常敏感,即优化结果的稳定性较差^[13-18]。事实上,这些扰动是不可避免的,因此在梁式管接头结构的优化设计中要适当考虑参数扰动的影

响,降低目标函数对设计变量扰动的敏感性,提高其密封性能的稳定性^[19-20]。稳健性设计是解决上述问题的一个有效方法,通过稳健性设计可以在提高产品质量特性的同时降低不确定性扰动对目标函数的影响^[21-22]。有鉴于此,本文对带椭圆弧凹槽的梁式管接头进行稳健性优化设计。首先基于有限元理论对其进行数值仿真,得到密封面接触压力分布云图,然后分别以两道密封的最大接触压力和密封面宽(即密封区域沿流体压力梯度方向的宽度)为密封性能的评价指标(优化目标),以结构参数为设计变量,建立 2 阶响应面模型,运用遗传算法和多目标优化的思想对响应面模型进行优化求解,在优化模型上增加表征目标函数稳健性的灵敏度附加项,调整约束条件,通过求解得到梁式管接头结构稳健的设计参数组合,提高其密封性能的稳健性。

1 梁式管接头有限元仿真分析

1.1 有限元建模

已有的研究表明,在梁式管接头的阴接头上设计椭圆弧凹槽,当阴阳接头受外套螺母施加的轴向预紧力时,可以在接触面上形成两道密封,从而提高密封性能^[4]。本文以 AS4207A^[5]的梁式管接头为基础,在阴接头处设计椭圆弧凹槽,具体结构如图 1 所示,梁式管接头整体的结构剖面图如图 2 所示。

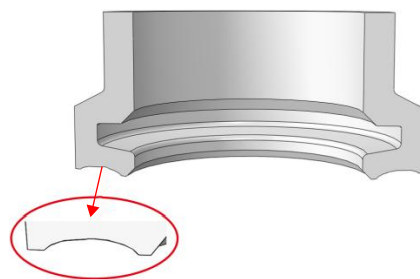


图 1 阴接头结构图

Fig. 1 Female connector structure

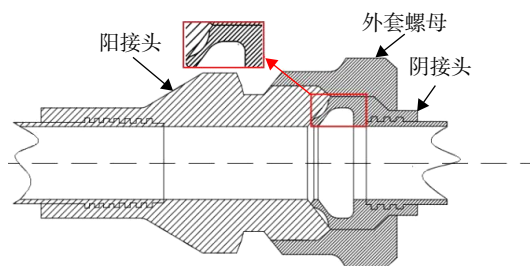


图 2 梁式管接头结构剖面图

Fig. 2 Sectional view of beam seal structure

本文所选取的管径规格为 12 mm, 根据 SAE MA2274^[23] 确定了阳接头的结构参数, 如图 3 所示为阴接头与阳接头的结构参数示意图, 其中阳接头厚为 d ; 椭圆中心到阴接头外径的距离为 l , 到阴接头锥面距离为 p ; 椭圆长半轴为 a , 短半轴为 b ; 阴接头锥面与径向夹角为 α ; 阴阳接头接触面第 1 道密封名义带宽为 c ; 密封梁截面宽度为 h ; U 形口轴向距离为 e , 与径向夹角为 θ , 底部距离阴接头外径为 δ ; β 、 γ 为倒角; R_1 、 R_2 为倒圆角半径, 具体参数取值如表 1 所示。

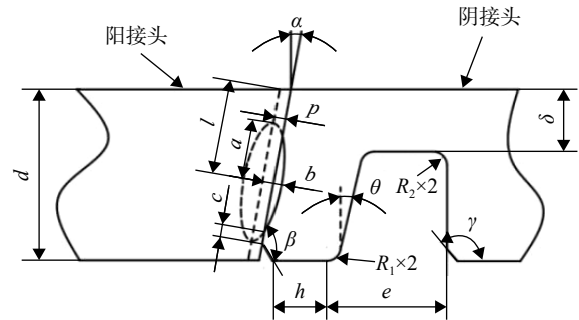


图 3 梁式管接头结构参数示意图^[4]
Fig. 3 Schematic diagram of structural parameters of beam seal^[4]

表 1 梁式管接头结构参数取值
Table 1 Value of the structure parameters of beam seal

参数	数值
d/mm	3.19
$\alpha/(\circ)$	8.5
l/mm	1.37
p/mm	0.1
a/mm	1.15
b/mm	0.4
c/mm	0.27
h/mm	0.6
$\theta/(\circ)$	11
e/mm	1.8
δ/mm	1.2
$\beta/(\circ)$	126.5
$\gamma/(\circ)$	135
R_1/mm	0.3
R_2/mm	0.1

采用 Abaqus 软件进行有限元建模, 考虑到梁式管接头为空间轴对称结构, 因此将其简化为轴对称模型。选用的材料均为 304 不锈钢, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3。

有限元模型定义阳接头为从面, 阴接头为主面, 采用面面接触模型, 滑移公式为有限滑移, 摩擦因数为 0.15。为了避免阴阳接触面穿透, 对阳接头网格进行加密, 阴接头网格尺寸为 0.1 mm, 单元类型为四结点双线性轴对称四边形单元, 对应模式为非协调模式(CAX4I)。图 4 所示为梁式管接头的有限元网格模型。



图 4 梁式管接头有限元网格模型
Fig. 4 Finite element mesh model of beam seal

1.2 网格无关性验证

对模型进行网格无关性验证, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 当网格尺寸小于 0.05 mm 时, 第 1 道密封最大接触压力已无明显变化; 当网格尺寸小于 0.06 mm 时, 第 2 道密封最大接触压力已无明显变化, 出于降低计算成本的考虑, 最终选取网格尺寸为 0.05 mm。

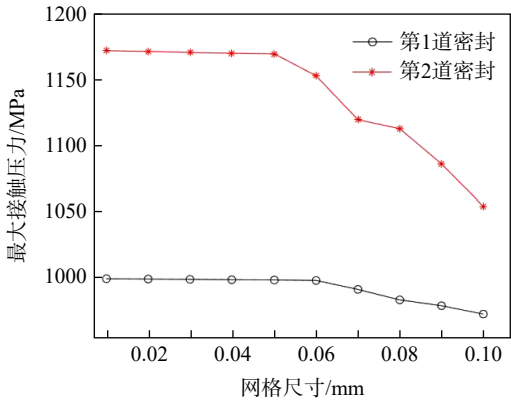


图 5 网格无关性验证
Fig. 5 Grid independence verification

1.3 有限元数值模拟有效性验证

为了验证有限元计算结果的正确性, 将有限元仿真的结果与文献 [4] 中的试验结果进行对比, 如图 6、图 7 所示, 有限元数值计算的结果与试验的结果变化趋势相近, 说明了有限元数值模拟的有效性。

1.4 仿真结果分析

图 8 所示为梁式管接头阴接头密封面的接触压力云图, 从图中可以明显看出有 2 处高应力环形区域, 形成两道密封, 位于内径一侧的为第 1 道

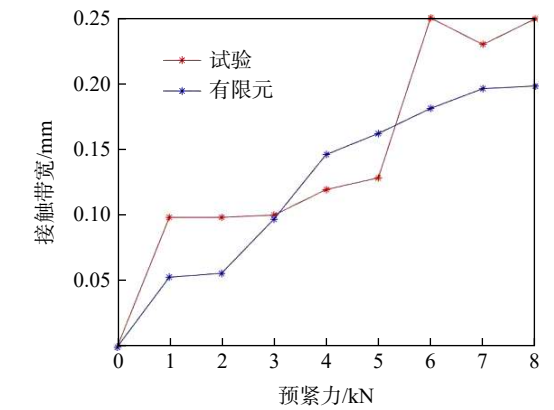


图 6 第 1 道密封接触面宽对比

Fig. 6 The first sealing contact surface width comparison

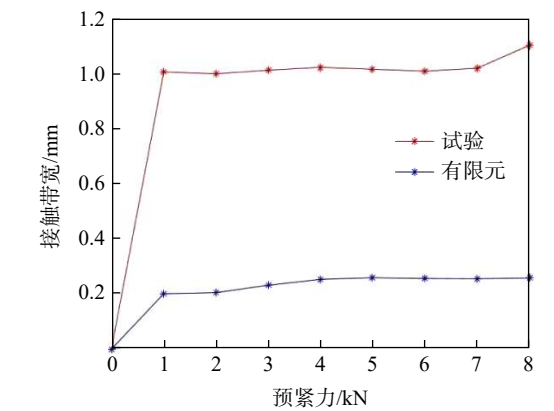


图 7 第 2 道密封接触面宽对比

Fig. 7 The second sealing contact surface width comparison

密封,位于外径一侧的为第 2 道密封。对于接触式静密封而言,接触面接触压力越大、接触面宽越大,密封的效果越好,因为接触压力越大、接触面宽越大,意味着更多的表面微凸体发生接触,接触面之间的缝隙填充越充分,形成横贯密封界面的泄漏通道的概率就越小^[24]。

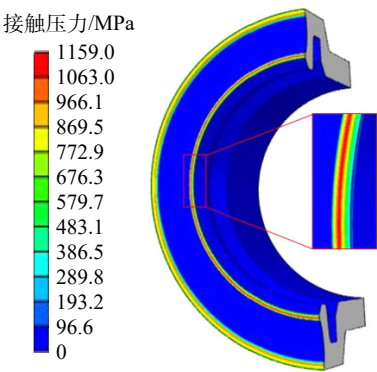


图 8 接触压力云图

Fig. 8 Contact pressure nephogram

2 梁式管接头结构稳健性优化设计

本文设计了 2 阶响应面模型,分别以第 1 道密封(内侧密封环带)最大接触压力、第 2 道密封(外侧密封环带)最大接触压力、第 1 道密封带宽、第 2 道密封带宽为响应变量,运用遗传算法求解该响应面模型,得到密封性能最优时的设计参数组合。

2.1 建立 2 阶响应面模型

分别以第 1 道密封最大接触压力 p_1 、第 2 道密封最大接触压力 p_2 、第 1 道密封面宽 H_1 、第 2 道密封面宽 H_2 作为响应变量。选用 $L_9(3^4)$ 等水平间距正交表安排数值模拟正交试验,不考虑各因素之间的相互作用,试验因素为 a 、 b 、 c ,对应 2 阶响应面模型中的设计变量分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ,其中各试验因素的取值范围分别为 1.05~1.25、0.26~0.54、0.06~0.48。试验结果如表 2 所示。

拟合响应面模型^[19, 25-26]时选用正交多项式,对应的 2 阶响应面方程为

表 2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal experimental results

试验编号	a (或 x_1)/mm	b (或 x_2)/mm	c (或 x_3)/mm	接触压力/MPa		接触面宽/mm	
				p_1	p_2	H_1	H_2
1	1.05	0.26	0.06	1 732.37	1 022.61	0.06	0.40
2	1.05	0.40	0.27	1 169.33	998.75	0.12	0.35
3	1.05	0.54	0.48	1 164.99	1 209.58	0.26	0.34
4	1.15	0.26	0.27	1 072.24	962.93	0.14	0.31
5	1.15	0.40	0.48	950.89	1 043.82	0.17	0.26
6	1.15	0.54	0.06	1 525.31	1 232.99	0.05	0.24
7	1.25	0.26	0.48	1 017.36	904.06	0.21	0.22
8	1.25	0.40	0.06	1 726.80	908.15	0.06	0.16
9	1.25	0.54	0.27	1 208.46	1 129.36	0.18	0.14

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_{i1} \varphi_{1i}(x) + \sum_{i=1}^n \hat{\beta}_{i2} \varphi_{2i}(x) \quad (1)$$

其中

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} = \frac{T}{N} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}_{ij} = \frac{1}{r \lambda_j S_j s_i^j} \sum_{z=1}^k W_{zj} T_{zi} \quad (i = 1, 2, \dots; j = 1, 2) \quad (3)$$

$$\begin{cases} \hat{y}_1(x) = 22\,327.185 + 15\,373.967x_1^2 + 227.024x_2^2 + 4\,604.875x_3^2 - 35\,550.241x_1 - 90.202x_2 - 3\,954.254x_3 \\ \hat{y}_2(x) = -4\,732.360 - 5\,116.067x_1^2 + 4\,762.645x_2^2 + 525.79x_3^2 + 11\,284.664x_1 - 2\,997.82x_2 - 288.916x_3 \\ \hat{y}_3(x) = 3.947 - 2.833x_1^2 + 1.701x_2^2 - 0.265x_3^2 - 6.499x_1 - 1.266x_2 + 0.516x_3 \\ \hat{y}_4(x) = 1.378 - 0.167x_1^2 + 0.935x_2^2 + 0.076x_3^2 - 0.566x_1 - 0.998x_2 - 0.025x_3 \end{cases} \quad (4)$$

将设计变量的取值范围转化为约束条件, 4 个方程具有相同的约束条件

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} g_1(x) = |x_1 - 1.15| - 0.1 \leq 0 \\ g_2(x) = |x_2 - 0.4| - 0.14 \leq 0 \\ g_3(x) = |x_3 - 0.27| - 0.21 \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

对式(4)进行方差分析, 结果分别如表 3~表 6 所示。分析可知, 统计量 F 的值均远大于 $F(0.01)$ 的值, 计算复相关系数 R^2 , R^2 的表达式为

式中 r 为同水平试验次数, k 为水平数, s_i 为水平间距, W_{zj} 、 λ_j 、 S_j 可通过正交多项式系数表获取, T 为试验结果的总和, T_{zi} 为各参数同水平试验结果之和, $\hat{\beta}_{ij}$ 为各项系数。

将表 2 中的试验结果代入式(1), 得到 2 阶响应面方程为式(4), 其中 $\hat{y}_1$ 表示第 1 道密封最大接触压力、 $\hat{y}_2$ 表示第 2 道密封最大接触压力、 $\hat{y}_3$ 表示第 1 道密封带宽、 $\hat{y}_4$ 表示第 2 道密封带宽。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

式中 y_i 为实际值, $\hat{y}_i$ 为拟合值, R^2 计算结果分别为 0.984 3、0.981 2、0.975 0、0.999 7, 结果均接近 1, 因此, 响应面模型均满足精度要求。

2.2 稳健性优化设计

采用遗传算法对已经得到的 2 阶响应面模型进行优化求解, 遗传算法中种群数量为 100, 交叉

表 3 方差分析(第 1 道密封最大接触压力)

Table 3 Analysis of variance (Maximum contact pressure of the first seal)

来源	波动平方和	自由度	方差	F 值	$F(0.01)$
拟合	704 018.324	6	352 009.163	62.706	12.1
残差	11 227.364	2	5 613.682		
总和	715 245.688	8			

表 4 方差分析(第 2 道密封最大接触压力)

Table 4 Analysis of variance (Maximum contact pressure of the second seal)

来源	波动平方和	自由度	方差	F 值	$F(0.01)$
拟合	115 296.049	6	57 648.025	52.157	12.1
残差	2 210.567	2	1 105.283		
总和	117 506.616	8			

表 5 方差分析(第 1 道密封面宽)

Table 5 Analysis of variance (The first sealing surface width)

来源	波动平方和	自由度	方差	F 值	$F(0.01)$
拟合	0.042	6	0.007	42	12.1
残差	0.001	2	0.000 5		
总和	0.043	8			

表 6 方差分析(第 2 道密封面宽)
Table 6 Analysis of variance (Second sealing surface width)

来源	波动平方和	自由度	方差	<i>F</i> 值	<i>F</i> (0.01)
拟合	0.062	6	0.010	3 100	12.1
残差	0.000 02	2	0.000 01		
总和	0.062 02	8			

概率为 0.75, 变异概率为 0.15, 遗传代数 为 1 000 代, 适应度函数选用 $\hat{y}_i(x)$, 因为求解目标是最大值, 所以最终的适应度函数形式为

$$f = -\hat{y}_i(x) \tag{7}$$

对式(4)中 $\hat{y}_1$ 进行优化计算, 将其代入式(7), 当 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.05, 0.54, 0.06)^T$ 时, 第 1 道密封最大接触压力为 1 746.03 MPa, 适应度值图像如图 9(a) 所示。对 $\hat{y}_2$ 进行优化计算, 当 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.103, 0.54, 0.06)^T$ 时, 第 2 道密封最大接触压力为 1 244.64 MPa, 适应度值图像如图 9(b) 所示。对 $\hat{y}_3$ 进行优化计算, 当 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.250, 0.54, 0.48)^T$ 时, 第 1 道密封带宽为 0.25 mm, 适应度值图像如图 9(c) 所示。对 $\hat{y}_4$

进行优化计算, 当 $\boldsymbol{X} = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.050, 0.26, 0.48)^T$ 时, 第 2 道密封带宽为 0.41 mm, 适应度值图像如图 9(d) 所示。随着遗传代数的增加, 适应度值图像均趋于平缓的直线, 说明优化结果是良好的。

在上述单目标最优解的基础上, 采用理想点法^[27-28]构造新的优化模型如式(8)所示, 进行多目标优化求解。

$$\begin{cases} \min Y_1(x) = \sum_{j=1}^4 \left[\frac{y_j(x) - y_j^*}{y_j^*} \right]^2 \\ \text{s.t. } g_u(x) \leq 0 \quad (u = 1, 2, 3) \end{cases} \tag{8}$$

其中

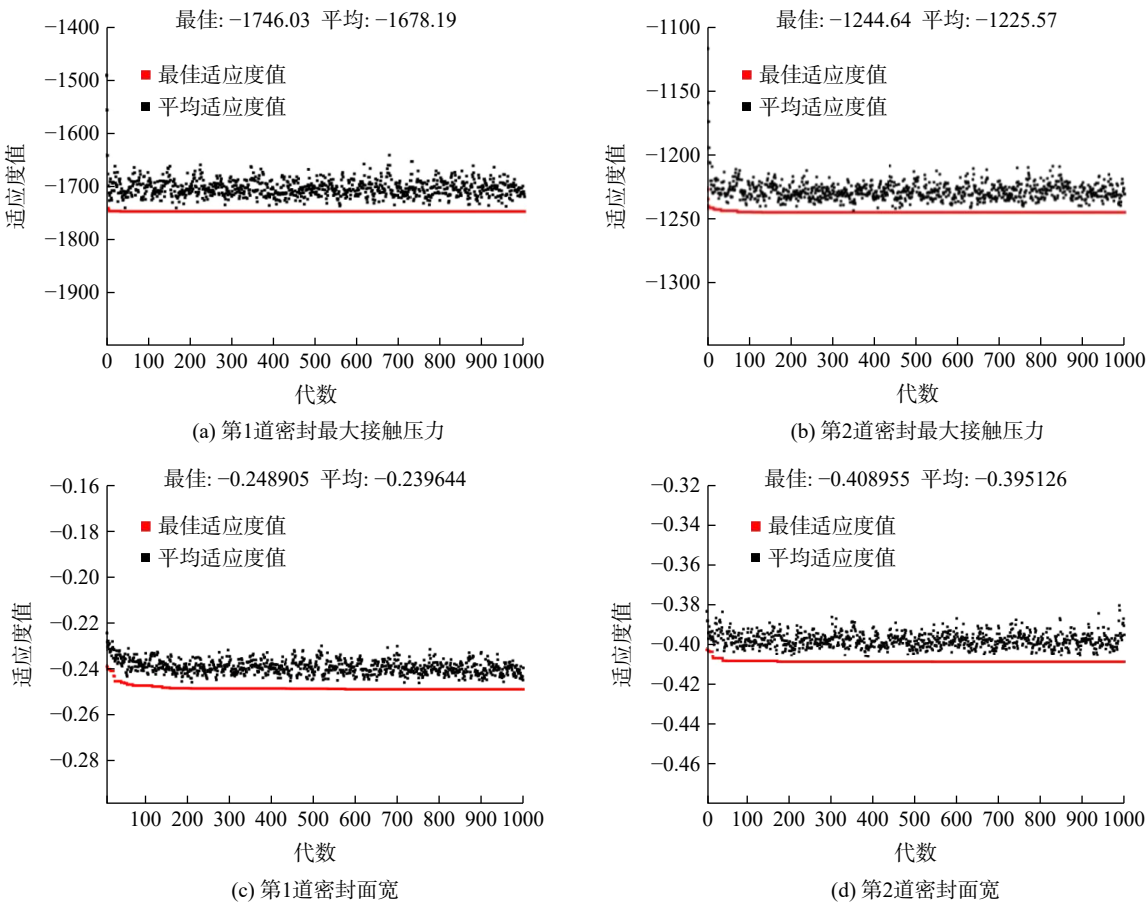


图 9 优化计算的适应度值
Fig. 9 Fitness value of the optimization calculation

$$[y_1(x), y_2(x), y_3(x), y_4(x)]^T = [\hat{y}_1(x), \hat{y}_2(x), \hat{y}_3(x), \hat{y}_4(x)]^T$$

$$[y_1^*, y_2^*, y_3^*, y_4^*]^T = [1\ 746.03, 1\ 244.64, 0.25, 0.41]^T$$

利用遗传算法对式(8)进行优化求解, 当 $X = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.05, 0.54, 0.48)^T$ 时, $Y_1(x)$ 取最小值 0.155 555, 如图 10 所示, 随着遗传代数的增加, 适应度值图像均趋于平缓的直线, 说明优化结果是良好的, 对应 $[y_1(x), y_2(x), y_3(x), y_4(x)]^T = [1\ 128.95, 1\ 228.49, 0.25, 0.34]^T$ 。

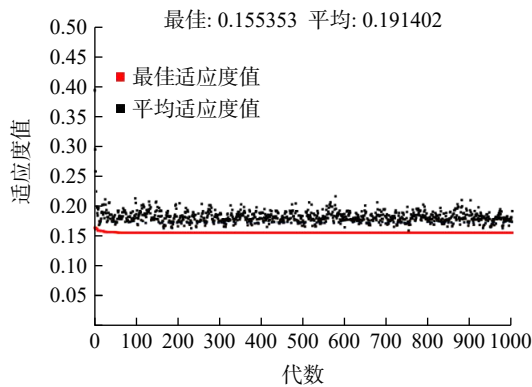


图 10 多目标优化计算的适应度值

Fig. 10 Fitness value of multi-objective optimization calculation

设计变量 a 、 b 、 c 优化前后的值如表 7 所示。由表 7 可知, 多目标优化后与优化前相比, 第 1 道密封最大接触压力降低了 2.62%, 影响相对较小; 第 2 道密封最大接触压力提高了 20.62%; 第 1 道密封带宽提高了 212.50%; 第 2 道密封带宽提高了 36.00%。综合来看, 多目标优化结果达到预期目标。

本文在多目标优化求解的基础上, 进行结构参数的稳健性优化设计。在多目标优化模型上添加表征目标函数稳健性的灵敏度附加项 Y_2 [19, 29], 如式(9)所示。

$$Y_2(x) = \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial y_1}{\partial x_i} \right| \Delta x_i + \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial y_2}{\partial x_i} \right| \Delta x_i + \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial y_3}{\partial x_i} \right| \Delta x_i + \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial y_4}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (9)$$

其中 Δx_i 为设计变量的扰动容差, 灵敏度附加项表示当设计变量发生扰动时目标函数的最大变化程度, 其结果越小, 则认为目标函数对参数扰动的灵敏度越小, 即目标函数对设计变量扰动不敏感, 达到稳健性设计的目的。优化模型可以转化为式(10)所示, 其中 x_i^l 为参数 x_i 的下限, x_i^u 为参数 x_i 的上限。

$$\begin{cases} Y = \min(Y_1, Y_2) \\ \text{s.t. } x_i^l \leq x_i \pm \Delta x_i \leq x_i^u \end{cases} \quad (10)$$

本文假设各设计变量存在 3% 的扰动, 即 $\Delta x_i = 0.03x_i$, 按照上述方法将多目标优化模型转换为稳健性优化模型, 构建新的数学模型如式(11)所示。

$$\begin{cases} Y = \min(Y_1, Y_2) \\ \text{s.t.} \\ 1.05 \leq x_1 \pm 0.03x_1 \leq 1.25 \\ 0.26 \leq x_2 \pm 0.03x_2 \leq 0.54 \\ 0.06 \leq x_3 \pm 0.03x_3 \leq 0.48 \end{cases} \quad (11)$$

利用遗传算法对式(11)进行优化求解, 当 $X = (x_1, x_2, x_3)^T = (1.156, 0.315, 0.429)^T$ 时, Y 取最小值 22.060 4, 如图 11 所示, 随着遗传代数的增加, 平均适应度值图像均趋于平缓的直线, 说明优化结果是良好的, 对应 $[y_1(x), y_2(x), y_3(x), y_4(x)]^T = [1\ 020.56, 977.01, 0.16, 0.28]^T$ 。

将稳健性优化计算的结果与多目标优化计算的结果、初始模型对应的结果进行对比, 如表 8 所示, 对应的灵敏度附加项计算的结果比较如表 9 所示。

根据表 8~表 9 分析可知, 稳健性优化后的结构参数与多目标优化后的结果相比, 两道密封的最大接触压力、接触面宽均有所下降, 这是因为稳健性优化降低了参数扰动对目标函数的影响程度, 虽然优化结果稍有降低, 但整体的稳健性更高, 说明稳健设计的结果是通过损失一部分最

表 7 结果比较

Table 7 Comparison results

来源	$a(\text{或 } x_1)/\text{mm}$	$b(\text{或 } x_2)/\text{mm}$	$c(\text{或 } x_3)/\text{mm}$	接触压力/MPa		接触面宽/mm	
				p_1	p_2	H_1	H_2
初始尺寸	1.150	0.40	0.27	1 159.36	1 018.52	0.08	0.25
多目标优化	1.050	0.54	0.48	1 128.95	1 228.49	0.25	0.34

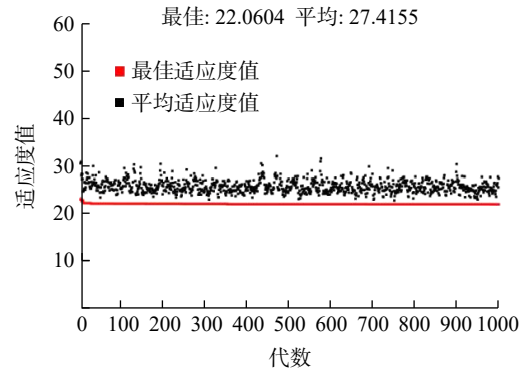


图 11 稳健性优化计算的适应度值

Fig. 11 Fitness value of the robust optimization calculation

佳性能指标来提升结构稳健性能的。

对比稳健性优化后的结构参数对应的两道密封最大接触压力、接触面宽和初始结构参数对应的两道密封最大接触压力、接触面宽,优化前后两道密封最大接触压力均变化较小,而优化后第 1 道密封接触面宽提高了 100%,第 2 道密封接触

面宽提高了 12%。对比优化前后灵敏度附加项的计算结果,稳健性优化后第 1 道密封最大接触压力的灵敏度附加项值降低了 96.23%,第 2 道密封最大接触压力的灵敏度附加项值降低了 20.66%,而两道密封接触面宽的灵敏度附加项值均取值较小且变化较小,因此稳健性优化达到预期目标。

通过有限元数值模拟,稳健性优化后的结构参数对应的梁式管接头密封面第 1 道密封最大接触压力为 1 062.77 MPa,对比数学模型结果,误差为 4.14%;第 2 道密封最大接触压力为 968.30 MPa,对比数学模型结果,误差为 0.89%;第 1 道密封有效密封带宽 H_1 为 0.169 mm,对比数学模型结果,误差为 5.63%;第 2 道密封有效密封带宽 H_2 为 0.27 mm,对比数学模型结果,误差为 3.57%,误差均相对较小,因此得到了梁式管接头稳健的设计参数组合,即当椭圆长半轴 a 为 1.156 mm、椭圆短半轴 b 为 0.315 mm、第 1 道密封名义宽度 c 为 0.429 mm 时,梁式管接头的密封稳健性更好。

表 8 优化结果比较

Table 8 Comparison of optimization results

来源	a (或 x_1)/mm	b (或 x_2)/mm	c (或 x_3)/mm	接触压力/MPa		接触面宽/mm	
				p_1	p_2	H_1	H_2
初始尺寸	1.150	0.400	0.270	1 159.36	1 018.52	0.08	0.25
多目标优化	1.050	0.540	0.480	1 128.95	1 228.49	0.25	0.34
稳健性优化	1.156	0.315	0.429	1 020.56	977.01	0.16	0.28

表 9 灵敏度附加项比较

Table 9 Comparison of sensitivity item

来源	a (或 x_1)/mm	b (或 x_2)/mm	c (或 x_3)/mm	接触压力/MPa		接触面宽/mm	
				p_1	p_2	H_1	H_2
初始尺寸	1.150	0.400	0.270	19.544	26.427	0.005	0.036
多目标优化	1.050	0.540	0.480	1.121	54.910	0.030	0.039
稳健性优化	1.156	0.315	0.429	0.737	20.968	0.007	0.037

3 结 论

本文以梁氏管接头为研究对象,以接触面宽和接触压力为密封性能的评价指标,对梁氏管接头的结构参数进行稳健性优化设计,得到了以下结论:

1) 在多目标优化模型上增加表征目标函数稳健性的灵敏度附加项,调整约束条件,构建新的数学模型并通过遗传算法求解,当椭圆长半轴 a 为 1.156 mm、椭圆短半轴 b 为 0.315 mm、第 1 道

密封名义宽度为 c 为 0.429 mm 时,与优化前相比两道密封最大接触压力均变化较小,而优化后第 1 道密封接触面宽提高了 100%,第 2 道密封接触面宽提高了 12%,梁式管接头的密封稳健性更好。

2) 计算稳健性优化前后的灵敏度附加项,稳健性优化后第 1 道密封最大接触压力的灵敏度附加项值降低了 96.23%,第 2 道密封最大接触压力的灵敏度附加项值降低了 20.66%,而两道密封接

触面宽的灵敏度附加项值均取值较小且变化较小, 即更稳健, 稳健性设计达到预期目标。

参考文献:

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第 12 册 传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 15-19.
Aeroengine Design manual Editorial Board. Aeroengine Design Manual: Volume 12 transmission and lubrication system[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 15-19. (in Chinese)
- [2] 陈芝来. 航空发动机管路连接件典型结构密封性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
CHEN Zhilai. Study on seal performance of typical structure of aeroengine tube connection[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [3] 闫洋洋. 航空卡套式管接头密封特性与振动失效机理研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
YAN Yangyang. Analysis on sealing properties and vibration failure mechanism of aviation ferrule pipeline fittings[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [4] 崔颖, 于颖嘉, 王永亮, 等. 一种梁式管接头密封性能与结构参数敏感性分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 147-155.
CUI Ying, YU Yingjia, WANG Yongliang, et al. Sealing performance and sensitivity analysis of structure parameters for a new beam seal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 147-155. (in Chinese)
- [5] US-SAE. Fitting end, external thread, beam seal, design standard: SAE AS 4207A[S]. Warrendale, US: SAE, 1996: 1.
- [6] US-SAE. Fitting end assembly, internal thread, retained nut, beam seal, design standard: SAE AS 4209B[S]. Warrendale, US: SAE, 1997: 1.
- [7] JEON J Y, KIM B T. A study on contact characteristics by the geometry variation of beam seal fitting of an aircraft fuel hose[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2013, 12(6): 101-108.
- [8] 李晓东. 可分离式航空液压管接头密封特性研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2018.
LI Xiaodong. Sealing performance of separable aviation hydraulic fittings[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 田雨松. 椭圆孔—锥孔和梁式管接头密封特性分析[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2021.
TIAN Yusong. Analysis of sealing characteristics of ellipsoidal head taper hole and beam pipe joint[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] SHI Fanghui, SALANT R F. Numerical study of a rotary lip seal with a quasi-random sealing surface[J]. Journal of Tribology, 2001, 123(3): 517-524.
- [11] SALANT R F, MASER N, YANG Bo. Numerical model of a reciprocating hydraulic rod seal[J]. Journal of Tribology, 2007, 129(1): 91-97.
- [12] YANG Bo, SALANT R F. A numerical model of a reciprocating rod seal with a secondary lip[J]. Tribology Transactions, 2008, 51(2): 119-127.
- [13] 张政, 周长聪, 戴志豪, 等. 基于重要性测度降维的液压管路稳健优化设计[J]. 航空学报, 2018, 39(8): 421902.
ZHANG Zheng, ZHOU Changcong, DAI Zhihao, et al. Robust optimization of hydraulic piping system based on importance measure dimension-reduction[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(8): 421902. (in Chinese)
- [14] 陈志英, 周平, 郑家祥. 基于均值一次二阶矩方法的稳健性优化设计[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1210-1216.
CHEN Zhiying, ZHOU Ping, ZHENG Jiaxiang. Robust optimization design based on mean value first order second moment method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(6): 1210-1216. (in Chinese)
- [15] SHARMA H, GANGULI R. Optimization of a higher-order sandwich composite beam under uncertainties[J]. Composite Structures, 2021, 269: 114003.
- [16] GAN Wenbiao, ZHANG Xiaocui, MA Tielin, et al. Robust design and analysis of a conformal expansion nozzle with inverse-design idea[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(1): 79-88.
- [17] WANG Xiaodong, HIRSCH C, LIU Zhiyi, et al. Uncertainty-based robust aerodynamic optimization of rotor blades[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2013, 94(2): 111-127.
- [18] LEI Gang, BRAMERDORFER G, LIU Chengcheng, et al. Robust design optimization of electrical machines: a comparative study and space reduction strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 300-313.
- [19] 李俊承, 张方晓, 张思才. 基于响应面模型的刀口金属密封结构稳健设计[J]. 机械强度, 2013, 35(5): 690-694.
LI Juncheng, ZHANG Fangxiao, ZHANG Sicai. Robust design to the knife-edge metal-sealing structure based on the response surface model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(5): 690-694. (in Chinese)
- [20] 罗佳奇, 陈泽帅, 曾先. 考虑几何设计参数不确定性影响的涡轮叶栅稳健性气动设计优化[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 123826.
LUO Jiaqi, CHEN Zeshuai, ZENG Xian. Robust aerodynamic design optimization of turbine cascades considering uncertainty of geometric design parameters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 123826. (in Chinese)
- [21] 贺谦, 李元生, 温志勋, 等. 涡轮叶片多学科可靠性及稳健设计优化[J]. 推进技术, 2010, 31(2): 193-197.
HE Qian, LI Yuansheng, WEN Zhixun, et al. Multidisciplinary probabilistic and robust design optimization for turbine blade[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(2): 193-197. (in Chinese)
- [22] 赵欢, 高正红, 夏露. 高速自然层流翼型高效气动稳健优化设计方法[J]. 航空学报, 2022, 43(1): 124894.
ZHAO Huan, GAO Zhenghong, XIA Lu. Efficient robust aerodynamic design optimization method for high-speed NLF airfoil[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(1): 124894. (in Chinese)
- [23] US-SAE. Fitting end, beam seal, bulkhead, external thread, design standard: SAE MA2274[S]. Warrendale, US: SAE, 2015: 1.
- [24] 高连新, 金烨, 张居勤. 石油套管特殊螺纹接头的密封设计[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 216-220.
GAO Lianxin, JIN Ye, ZHANG Juqin. Seal design of premium threaded casing connections[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 216-220. (in Chinese)
- [25] 艾延廷, 刘海月, 田晶, 等. 薄壁机匣螺栓连接结构多目标优化设计[J]. 推进技术, 2019, 40(4): 876-883.
AI Yanting, LIU Haiyue, TIAN Jing, et al. Multi-objective optimization design of bolt connected flange for thin-walled casing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(4): 876-883. (in Chinese)

- nese)
- [26] 谢翌, 严春城, 阮登芳, 等. 基于响应面模型的波瓣混合排气系统近似模型研究[J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1037-1048.
XIE Yi, YAN Chun Cheng, RUAN Dengfang, et al. Research on approximation model of lobed mixing exhaust system based on response surface methodology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6): 1037-1048. (in Chinese)
- [27] 应玫茜. 多目标规划的理想点法[J]. 系统科学与数学, 1981, 1(1): 1-8.
YING Meiqian. An ideal point method for multiobjective programming[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1981, 1(1): 1-8. (in Chinese)
- [28] 王小刚. 管路锥形密封结构的稳健设计[D]. 四川 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.
WANG Xiaogang. Robust design of pipeline cone sealing structure[D]. Mianyang Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2009. (in Chinese)
- [29] 周盛强, 向锦武. 飞机总体设计中的一种多目标鲁棒优化方法[J]. 工程设计学报, 2006, 13(6): 426-430.
ZHOU Shengqiang, XIANG Jinwu. Multi-objective robust optimization method to aircraft conceptual design[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(6): 426-430. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)