文章编号:1001-2060(2024)04-0171-10

某型航改燃气轮机机匣安装边结构参数优化设计

高万彬,张 轲

(中国航发沈阳发动机研究所,辽宁沈阳110015)

摘 要:航政燃气轮机机匣安装边的性能受多个结构参数和载荷参数的影响,为了在给定的结构参数和载荷参数 范围内设计性能最优的安装边结构,提出一种机匣安装边结构参数优化设计方法。首先,采用拉丁超立方抽样方 法进行实验设计,构建仿真算例样本空间;其次,采用有限元分析方法分析了螺栓孔中心距、螺栓孔直径、安装边厚 度等结构参数和机匣内介质压力、介质温度、单个螺栓预紧力等载荷参数对安装边最大等效弹性应力、接触面平均 间隙和接触面最大接触压强等特性的影响规律;然后,构建了机匣安装边密封性能计算的代理模型,并对给定工况 下燃气轮机机匣安装边结构进行了参数优化设计;最后,针对安装边结构优化设计结果,试验验证了其密封性能以 及代理模型的计算精度。结果表明:基于代理模型计算得到的机匣安装边结构密封性能与试验结果误差在10%以 内,该方法可用于航政燃气轮机机匣安装边结构的工程优化设计与性能评估。

关键 词:航改燃气轮机;机匣安装边;代理模型;结构优化设计;拉丁超立方体实验设计

中图分类号: V232.5 文献标识码: A DOI: 10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.04.021

[引用本文格式]高万彬,张 轲. 某型航改燃气轮机机匣安装边结构参数优化设计[J]. 热能动力工程,2024,39(4):171-180. GAO Wan-bin,ZHANG Ke. Optimization design of structural parameters of casing mounting edge of an aeroderivative gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(4):171-180.

Optimization Design of Structural Parameters of Casing Mounting Edge of an Aeroderivative Gas Turbine

GAO Wan-bin, ZHANG Ke

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang, China, Post Code: 110015)

Abstract: The performance of the mounting edge of the gas turbine casing modified for aviation was influenced by multiple structural and load parameters. In order to design an optimal mounting edge structure within a given range of structural and load parameters, a structural parameter optimization design method for the mounting edge of the gas turbine casing was proposed. Firstly, this paper adopted the Latin hypercube sampling method for experimental design and constructed a simulation case sample space; secondly, the finite element analysis method was used to analyze the influence of structural parameters such as bolt hole center distance, bolt hole diameter and mounting edge thickness, as well as load parameters such as medium pressure inside the casing, medium temperature and preload of a single bolt, on the characteristics of the mounting edge, including the maximum equivalent elastic stress, average gap of the contact surface and maximum contact pressure of the contact surface; thirdly, a surrogate model for calculating the sealing performance of the mounting edge of the gas turbine casing was constructed, and the structural parameters of the mounting edge of the gas turbine casing under given working conditions were optimized; finally, experimental verification was conducted on the optimized design results of the mounting edge structure to test its sealing performance and the calculation accuracy of the surrogate model. The results show that the error between the sealing performance of the mounting edge structure calculated

收稿日期:2023-01-10; 修订日期:2023-03-28

作者简介:高万彬(1992-),男,中国航发沈阳发动机研究所工程师.

based on the surrogate model and the experimental results is within 10%. This method can be used for engineering optimization design and performance evaluation of the mounting edge structure of the gas turbine casing modified for aviation.

Key words: aeroderivative gas turbine, mounting edge of casing, surrogate model, structural optimization design, Latin hypercube experimental design

引 言

机匣是航改燃气轮机承力和传力的主要构件, 受限于制造和装配工艺要求^[1-2],机匣通常由数段 组成,机匣各段之间的连接处主要采用安装边结构, 并通过螺栓连接^[3-4]。

在燃气轮机实际工作过程中,机匣承受着极其 复杂的载荷工况,包括气动压力载荷、重力载荷、热 应力载荷以及相邻组件传递过来的弯矩和扭矩载荷 等^[5-7]。因而,航改燃气轮机机匣安装边的结构强 度和密封性能与结构参数和载荷参数的选取紧密相 关。在以往的安装边结构设计时,通常只能采用经 验公式针对其结构强度和密封性等方面进行粗略校 核。随着航改燃气轮机技术的发展,对航改燃气轮 机的性能要求不断提高,传统设计方法已经难以满 足先进燃气轮机的性能要求^[8-10]。优化航改燃气 轮机机匣安装边结构设计方法,改善安装边的密封 性能,对提高燃气轮机的性能显得尤为重要^[11-12]。

受益于有限元仿真技术和先进试验技术的快速 发展,近年来国内外许多学者已经开始通过仿真与 试验相结合的手段对机匣安装边结构强度及其密封 特性开展研究。艾延廷、赵长辉等人^[13-15]通过试验 的方法对影响安装边螺栓连接结构密封特性的因素 进行了系统分析与研究,设计并搭建了安装边螺栓 连接结构密封特性试验系统,研究了螺栓加载方 案、螺栓预紧力和螺栓数量等因素对安装边密封特 性的影响规律。国强等人^[16]研究了机匣安装边螺 栓加载顺序、安装边接触状态及接触面表面粗糙 度等因素对机匣安装边密封性能的影响。现有公 开发表的文献大多针对特定安装边结构开展密封 性能研究,针对机匣安装边结构的优化设计研究却 较少。 本文针对某型航改燃气轮机机匣安装边结构,首先采用拉丁超立方抽样方法进行实验设计 (Design of Experiment, DOE),构建仿真算例样本空 间;其次,采用有限元分析方法分析结构参数和载荷 参数对机匣安装边结构强度和密封性能的影响规 律;再次,构建机匣安装边密封性能计算的代理模 型,并对给定工况下燃气轮机机匣安装边结构进行 参数优化设计;最后,针对安装边结构优化设计结 果,开展试验研究,验证其密封性能以及代理模型的 计算精度。本文的研究对于燃气轮机机匣安装边结 构设计及其密封性能计算具有实际应用价值。

1 计算模型与算例设计

1.1 机匣安装边结构及参数

本文采用的某型航改燃气轮机机匣安装边为分 段式结构,前后机匣通过螺栓连接,如图1(a)所示。



Fig. 1 Structure and main parameters of mounting edge of casing

图 1(b) 中给出影响机匣安装边结构性能的主要结构参数包括: 机匣内径 *D*_i、安装边厚度 *B*、螺栓 孔中心距 *D*₁、螺栓孔直径 *d* 等。 本文所述算例计算中采用的前后机匣安装边及 螺栓材料为 GH4169,螺母材料采用 GH738,主要材 料参数如表1所示。

	表 1	GH4169	• 和 GH73	8主	要材料参	診数	
Tab.	1 Para	meters o	f GH4169	and	GH 738	materials	5

材料	温 度	屈服强度 R _{p0.2} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	弹性模量/GPa	泊松比	断后伸长率 A/%	密度/g·cm ⁻³
GH4169	常温	≥1 030	≥1 270	204	0.30	≥12	8.24
	650 ℃	≥865	≥1 000	146	0.32	≥12	8.24
GH738	常温	≥830	≥1210	215	0.30	≥14	8.22
	540 °C	≥720	≥1 070	178	0.31	≥14	8.22

表2给出了本文所采用安装边结构参数,及工 作中机匣内介质压力 p、机匣内介质温度 T 和单个 螺栓的预紧力矩 M 3 个载荷参数的许用范围。

表 2 某型航改燃气轮机用机匣安装边结构参数 与载荷参数及其许用范围

Tab. 2 Structural and load parameters and its allowable range of mounting edge of casing for a certain type of aeroderivative gas turbine

参数类别	名 称	许用范围
结构参数	机匣内径 D_i/mm	344 ~ 944
	安装边厚度 B/mm	4 ~ 12
	螺栓孔中心距 D_l/mm	400 ~1 000
	螺栓孔直径 d/mm	4.5 ~ 10.5
	螺栓孔角向间距 α/(°)	2.553 ~ 6.0
载荷参数	机匣内介质压力 p/MPa	0.3 ~ 3.0
	机匣内介质温度 T/K	450 ~1 050
	单个螺栓预紧力矩 M/N·m	2 ~48

1.2 计算模型

本文在建立机匣安装边结构仿真计算模型时, 由于主要关注的是前后机匣安装边及其接触面的特 性,因此忽略了机匣上焊缝、加强肋以及安装边上的 其他连接结构。此外,由于机匣结构具有轴对称周 期性,在本次分析中计算模型仅采用单个螺栓建模, 并给定周期性边界条件,这样在保证计算结果准确 性的前提下可以大大降低网格量与计算量。图2为 机匣安装边结构计算模型及其边界条件。由图可 知,在机匣内侧给定介质压力与恒温边界条件;机匣 外侧给定自然对流换热边界条件;图示左侧,机匣左 端面给定拉伸力边界条件,该力是机匣所受轴向力 的表征;图示右侧,机匣右端面给定固定约束边界 条件。





对上述机匣安装边结构计算模型进行了网格划 分(如图3所示)与网格无关性验证(如表3所示)。

根据表 3 中所示安装边接触面最大接触压强 结果可知,当网格单元量达到 149 455 后,计算结果 已经几乎不受网格量影响,因此本文采用本组网 格尺寸,即螺栓网格尺寸 0.8 mm、安装边网格尺寸 1.5 mm,对机匣安装边计算模型进行网格划分。



图 3 机匣安装边结构计算模型网格 Fig. 3 Grids of computational model of mounting edge structure of casing

表 3 计算模型网格无关性验证

Tab. 3 Grid independence verification of

computational model

网格尺寸/mm		++ + *b	同材料	接触面最大	误差/%	
安装边	—————————————————————————————————————		网怕釵	接触压强/MPa		
3.0	1.5	35 363	21 461	789.80	0	
2.0	1.2	86 768	57 142	796.32	0.83	
1.5	0.8	230 387	149 455	800.28	0.50	
1.2	0.5	443 512	253 783	801.57	0.16	

1.3 算例设计

在进行机匣安装边结构性能仿真算例设计时发现,由于表1所示结构参数与载荷参数的许用范围 均较广,若采用全因素交叉设计方法就有可能出现 以下算例组合情况:(1)机匣内径取344mm、螺栓 孔中心距取400mm、螺栓孔直径取10.5mm,此时 即便采用最大的螺栓孔角向间距6.0°,也会存在螺 栓相互干涉的问题;(2)机匣内径取944mm、螺栓 孔中心距取1000mm、螺栓孔直径取5.5mm,机匣 内介质压力给定3.0MPa、机匣内介质温度给定 1050K,此时即便采用最小的螺栓孔角向间距 2.553°,并给定M5螺栓所能承受的最大力矩,也会 存在连接强度不足的问题。

上述情况要么与实际情况相悖,要么会导致仿 真计算无法收敛。为了避免上述大尺寸机匣采用小 螺栓或小尺寸机匣采用大螺栓等与实际情况不符的 算例组合出现,需要依据机匣内径对结构参数进行 分段处理,分段依据包括两种确定原则:

(1) 螺栓孔直径最大值确定原则

对于给定内径的机匣,在最小螺栓孔角向间距的情况下,确保螺栓之间互相不干涉,且留有足够的扳手操作空间。依据文献[17]提供的数据可拟合如下公式:

$$d \le \left(\frac{\pi \alpha D_l}{1782}\right)^{25/18} + 0.5$$
 (1)

(2) 螺栓孔直径最小值确定原则

对于给定内径的机匣,在最恶劣载荷工况(机 匣内介质压力和温度均最高)、螺栓孔角向间距最 大情况下,所采用的螺栓应满足文献[17]所述强度 要求:

$$d \ge \sqrt{\frac{1.3SD_i^2 p}{30[R_{p0.2}]}} \tag{2}$$

式中:*R*_{p0.2}—螺栓材料屈服强度, MPa; S—安全系数,通常取1.2~1.7。

最终的机匣安装边结构参数分段结果如表 4 所示。

表4 机匣安装边结构参数分段结果

Tab. 4 Segmentation results of structural parameters of mounting edge of casing

参数名称及螺栓规格	第一段	第二段	第三段
机匣内径 D_i/mm	344 ~494	494 ~ 612	612 ~ 944
安装边厚度 B/mm	4 ~ 12	4~12	4 ~ 12
螺栓孔中心距 D_l/mm	400 ~ 550	550 ~ 668	668 ~1 000
螺栓孔直径 d/mm	4.5~6.5	5.5~8.5	8.5~10.5
螺栓孔角向间距 α/(°)	2.553~6.0	2.553~6.0	2.553~6.0
对应螺栓规格	M4 \M5 \M6	M5 \M6 \M8	M8 M10

之后依次对各段参数进行算例设计,由于本文 涉及的安装边结构参数有5个,若采用全因素交叉 实验设计方法,即使每个参数只选取4个水平,则每 一段的算例数量将高达625个,这将消耗大量的计 算资源。为了降低算例数量,本文采用拉丁超立方 体实验设计方法进行算例设计。该方法是一种从多 元参数分布中近似随机抽样的方法,属于分层抽样 技术,常用于计算机实验或蒙特卡洛积分等。在统 计抽样中,拉丁方阵是指每行、每列仅包含一个样本 的方阵。拉丁超立方体则是拉丁方阵在多维中的推 广,每个与轴垂直的超平面最多含有一个样本。假 设有N个变量,可以将每个变量的取值范围分为Q 个概率相同的区间,此时,可以选取Q个满足拉丁 超立方条件的样本点。

本文依据该方法在每段结构参数中抽取 100 个 样本点形成该段的算例样本空间。本文将结构参数 分为了 3 段,因此总计设计了 300 个算例样本点,表 5 所示为部分算例样本点。

ま ら	机 面 实 生 访 性 能 佑 首 笛 励 #	羊木占
K J	加生女衣也住能加具异ற作	十十二

Tab. 5 Simulation case sample points for the performance of mounting edge of casing

算例样本点	参数分段	机匣内径 $D_{\rm i}$ /	安装边厚度 B/	螺栓孔中心距 D1/	螺栓孔直径 d/	螺栓孔角向间距
序号	结果	mm	mm	mm	mm	α ∕(°)
1	第一段	388.25	11.64	444.25	5.01	2.392
2		424.25	5.64	480.25	4.59	1.776
3		346.25	9.16	402.25	5.35	1.406
100		422.75	9.80	478.75	5.450	2.063
101	第二段	528.81	11.64	584.81	5.755	2.392
102		557.13	5.64	613.13	5.545	1.776
103		495.77	9.16	551.77	5.925	1.406
200		555.95	9.80	611.95	5.975	2.063
201	第三段	709.94	11.64	765.94	9.010	2.392
202		789.62	5.64	845.62	8.590	1.776
203		616.98	9.16	672.98	9.350	1.406
300		786.30	9.80	842.30	9.450	2.063

2 计算结果及分析

通过对机匣安装边结构算例样本点进行仿真计 算,得到载荷参数(机匣内部介质压力、机匣内部介 质温度、单个螺栓预紧力)和结构参数(螺栓孔中心 距、螺栓孔直径、安装边厚度)对机匣安装边结构强 度和密封性能的影响规律。

图 4 所示为算例样本点 101 在机匣内介质压力 0.82 MPa、介质温度 539 K、螺栓预紧力矩 12 N·m 载荷工况下计算得到的安装边性能。其中图 4(a)为 机匣安装边等效弹性应力 σ 云图,其反映了机匣安 装边的整体结构强度。图 4(b)和图 4(c)分别为前 后机匣安装边接触面的平均间隙 δ 和接触压强 p_c 云图,其反映了安装边的接触状态,由此可以计算出 安装边的密封性能。

本节接下来将依次分析各载荷参数和结构参数 对上述机匣安装边性能的影响规律。

2.1 机匣内介质压力的影响

图 5 给出了机匣内介质压力对机匣安装边性能 的影响规律。由图可知,安装边最大等效弹性应力 随着介质压力的增大呈现出先增大后降低的规律。 这是由于当工作压力刚开始增大时,前后机匣安装 边发生了一定的分离,安装边的变形导致应力的逐 渐增加;当压力增加到约2.5 MPa时,螺栓发生了一 定程度的轴向拉伸,导致前后机匣安装边分离量明 显增大,此时安装边变形有所缓解,应力略有降低。





on the performance of mounting edge

由图 5 可见,安装边接触面平均间隙和最大接触压强均随着介质压力的增大而增大。这是由于前后机匣安装边接触面的接触力由两个部分组成,一个是由螺栓预紧力产生的,另一个是由机匣内部介质压力作用在机匣端面产生的轴向力,两个力的作用方向是相反的。随着机匣内部介质压力的增大,前后机匣安装边会发生变形,接触面会逐渐分离,分离量由螺栓中心距所在圆向机匣内径方向逐渐增大,导致接触面平均接触间隙逐渐增大,而受安装边变形的影响接触面最大接触压强也逐渐增大。

2.2 机匣内介质温度的影响

图 6 给出了机匣内介质温度对机匣安装边性 能的影响规律。由图可知,安装边最大等效弹性应 力和接触面最大接触压强均随着介质温度的增大 而增大,但接触面平均间隙随着介质温度的增大而 减小。这是由于介质温度的升高使得安装边产生 膨胀变形,前后机匣安装边的的变形挤压使得安 装边最大等效弹性应力和接触面最大接触压强均 增大、接触面平均间隙减小,因而安装边密封性能 变好。

2.3 螺栓预紧力的影响

图 7 给出了螺栓预紧力对机匣安装边性能的影响规律。螺栓预紧力 F_M 是螺栓数量、螺栓孔直径和预紧力矩的函数,与螺栓数量和预紧力矩呈正比、与螺栓孔直径呈反比。由图可知,当螺栓预紧力增

加时,安装边最大等效弹性应力先增大后减小。这 是由于预紧力增加时,前后机匣安装边接触面紧密 贴合,导致最大等效弹性应力先增大;但当预紧力增 大到一定程度时螺栓受到的拉力会大于其许用应 力,螺栓发生了一定程度的塑形变形,安装边变形有 所缓解,导致最大等效弹性应力下降。安装边接触 面平均间隙随着螺栓预紧力的增加呈现出先线性快 速降低而后略有增加的规律,而接触面最大接触压 强的变化规律则与之相反。这是由于螺栓预紧力的 增加使得安装边接触面贴合的更好,最大接触压强 增大,越不容易发生泄漏;但当预紧力增大到一定程 度时螺栓受到的拉力会大于其许用应力,接触面会 随之发生一定程度的分离,接触面平均间隙随之有 所增大。





Fig. 6 Influence of medium temperature in the casing

on the performance of mounting edge



performance of mounting edge

2.4 螺栓孔中心距的影响

图 8 给出了螺栓孔中心距对机匣安装边性能的 影响规律。





由图可知,安装边最大等效弹性应力随着螺栓 孔中心距的增大先增大后降低,接触面平均间隙的 规律与之相反。这是由于当螺栓规格和间距不变而 螺栓孔中心距增大时,螺栓的数量增多,安装边受到 的螺栓预紧力会增大,导致安装边的变形和应力变 大,接触面平均间隙逐渐减小。但当螺栓孔中心距 增大到一定程度时,相邻螺栓之间的绝对距离随之 变大,安装边螺栓孔之间的接触面连接不紧密,导致 安装边平均间隙增大而安装边最大等效应力略有 减小。

2.5 螺栓孔直径的影响

图9给出了螺栓孔直径对机匣安装边性能的影 响规律。由图可知,安装边最大等效弹性应力和接 触面最大压强均随着螺栓孔直径的增加先增大而后 趋于平稳,而安装边接触面平均间隙则先减小后趋 于平稳。分析其原因是由于螺栓孔直径由4.5 mm 增加到5.5 mm时,安装边接触表面变得更加紧密, 导致安装边最大等效弹性应力、接触面的最大压强 增大,平均间隙则减小。而当螺栓孔直径大于5.5 mm后,螺栓孔直径增加会导致螺栓预紧力略有下 降,这对安装边的最大等效弹性应力、接触面的最大 压强和平均间隙影响较小。



2.6 安装边厚度的影响

图 10 给出了安装边厚度对机匣安装边性能的 影响规律。由图可知,随着安装边厚度的增加,安装 边最大等效弹性应力、接触面最大接触压强逐渐减 小,但接触面平均间隙逐渐增大。这是由于螺栓预 紧力的施加是通过螺栓头部下表面与螺母上表面对 安装边外表面的挤压而产生的,安装边的应力值沿 垂直安装边表面的方向递减。因此,在预紧力相同 的情况下,安装边厚度越厚,应力值、最大接触压强 减少的幅度越大,安装边的最大等效弹性应力和接 触面的最大压强越小,接触面平均间隙越大,安装边 连接越不紧密。



图 10 安装边厚度对安装边性能的影响 Fig. 10 Influence of the thickness of mounting edge on the performance of mounting edge

3 参数优化设计和试验验证

3.1 参数优化设计

在机匣安装边的工程应用中,往往要求安装边 结构可靠且密封性能良好,这就要求设计人员设计 的结构既要保证安装边接触面平均间隙足够小,又 要保证安装边接触面的最大接触压强也足够小,依 据上一节的分析,可以发现二者是矛盾的。因此,需 要对安装边结构进行参数优化设计。

在进行机匣安装边结构优化设计时,由于其性 能受载荷参数和结构参数等因素的影响较大,因而 直接采用参数化建模和仿真计算的方法将耗费巨大 的人力物力。因此,在尽可能不影响计算结果精度 的情况下,为简化计算,本文以第2节300个样本点 的计算结果为基础,构建机匣安装边结构性能计算 的响应面代理模型,以前后机匣安装边接触面平均 间隙和最大接触压强值均最小为优化设计目标,开 展机匣安装边结构参数优化设计。

根据某型航改燃气轮机设计要求,在机匣内介 质压力为0.82 MPa、机匣内介质温度为539 K、机匣 内径分别为344,612 和944 mm 的工况下,开展机 匣安装边结构参数优化设计。表6给出了3种结构 对应的优选点的结构参数(螺栓孔中心距、螺栓孔 直径、安装边厚度、螺栓孔间距)、载荷参数(单个螺 栓预紧力矩)和优化目标(安装边接触面平均间隙 和最大接触压强)结果。

表 6 机匣安装边结构参数优化设计结果

	•••• •••		14			4	e				•
Toh 6	Infimizod	docian	roculte	nt	ctriiotiiro l	noromotore	tor	mounting	00 00	nt	oocina
1 ap. 0	VUUUUZEU	UCSIZII	I COUILO	UI	SU UCLUI AI	Dalameters	IVI.	mounting	CUYE	vi.	Casille
	- F			~ -		F					8

全粉米 刑	÷ Wr	优选点参数取值					
多奴矢型	参 姒	机匣内径 344 mm	机匣内径 612 mm	机匣内径 944 mm			
结构参数	螺栓孔中心距 D_1/mm	400	668	1 000			
	螺栓孔直径 d/mm	5.5	10.5	10.5			
	安装边厚度 B/mm	10.8	12.0	12.0			
	螺栓孔角向间距 α/(°)	4.427	4.349	2.871			
载荷参数	单个螺栓预紧力矩 M/N·m	3.4	47.7	47.7			
优化设计目标	接触面平均间隙 δ/mm	0	0.002 57	0.005 59			
	接触面最大接触压强 p _{e,max} /MPa	22.825	67.866	42.559			

3.2 试验验证

根据优化设计结果,选取机匣内径 612 mm 的

安装边结构设计相应的试验件,进行优化结果的试验验证,试验系统示意如图 11 所示。



图 11 典型安装边密封高温性能试验系统



试验系统中安装边的螺栓孔中心距为668 mm, 温控系统设置密封腔内温度为539 K,调节进气流 量使密封腔内压力为0.82 MPa,螺栓孔直径为10.5 mm,选取 M10 螺栓,螺栓数量为80个,安装边厚度 12 mm,利用排水法,在该工况下每隔10 min进行泄 漏量测量,试验结果如表7 所示。

表7 机匣安装边结构泄漏量试验结果

Tab. 7 Leakage test results of mounting edge structure of casing

试验参数	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min
泄漏量 m /10 ⁻³ g·s ⁻¹	9.09	9.15	9.96	9.57	9.53

由表7计算得到平均泄漏量为9.46×10⁻³g/s。 将表7中泄漏量试验结果代入式(3)可计算得到实际的安装边接触面平均间隙值。

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{6 \,\overline{m}\mu(D_1 - D_i)}{\rho_a \pi D_i p}} \tag{3}$$

式中: ρ_a 和 μ —空气在 539 K 时的密度和动力粘度; \overline{m} —试验测得的平均泄漏量。

将安装边接触面平均间隙试验结果与表6中的 计算结果进行对比可评估本文优化设计所采用代理 模型的计算精度:

$$\frac{|\delta_{\text{Cal}} - \delta_{\text{Exp}}|}{\delta_{\text{Exp}}} = \frac{|0.0257 - 0.0236|}{0.0236} \approx 8.90\%$$

(4)

由此可得,采用代理模型所得的机匣安装边结构性能计算结果与试验结果的误差小于10%。因此,本文建立的机匣安装边结构参数优化设计方法可为工程应用提供参考。

4 结 论

(1)机匣安装边结构密封性能随着机匣内介质 压力和安装边厚度的增加而逐渐变大,随着机匣内 介质温度的升高逐渐降低,随着螺栓预紧力和螺栓 孔中心距的增大呈现出先减小后增大的趋势,随着 螺栓孔直径的增大呈现出先减小后趋于稳定的 规律。 (2) 在机匣内介质温度为 539 K,介质压力为 0.82 MPa、机匣内径为 612 mm 的工况下,基于响应 面代理模型计算得到的机匣安装边结构优化设计点 的密封性能,与试验结果相比误差在 10% 以内。

参考文献:

- [1] 胡广阳. 航空发动机密封技术应用研究[J]. 航空发动机,
 2012,38(3):1-4.
 HU Guang-yang. Application research of seal technologies for aero-engine[J]. Aeroengine, 2012, 38(3):1-4.
- [2] 陈科山,宋鹏亮,薛 旭,等. 基于深度学习的航空燃气轮机安装位置识别[J].北京交通大学学报,2020,44(5):63-69.
 CHEN Ke-shan,SONG Peng-liang,XUE Xu, et al. Aeroengine installation position recognition based on deep learning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2020,44(5):63-69.
- [3] 雷晓波,张强,文敏,等. 航空发动机安装节推力测量技术 与试验[J]. 航空学报,2017,38(12):16-23.
 LEI Xiao-bo, ZHANG Qiang, WEN Min, et al. Mount thrust measurement technique for aero-engines and its tests[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2017,38(12):16-23.
- [4] 王晓梅,张春青. 航空发动机机匣同轴度的测量与调整[J]. 航 空发动机,2015,41(2):76-80.
 WANG Xiao-mei, ZHANG Chun-qing. Measurement and adjustment of aeroengine casing concentricity [J]. Aeroengine, 2015, 41(2):76-80.
- YANG Bin. Blade containment evaluation of civil aircraft engines
 [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(1):9 16.
- [6] CAO Zhen-zhong, ZHANG Fan, ZHANG Ding-guo, et al. Failure mechanisms of bolted flanges in aero-engine casings subjected to impact loading [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(12):125-144.
- [7] 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):23-26,45.
 TIAN Jing,QIU Ming-xing,LI Jian, et al. Study of installation system for high thrust-weight ratio engine with thrust vectoring[J].
 Aeroengine,2012,38(2):23-26,45.
- [8] 马浩,张亚辉,朴思扬. 机匣螺栓连接结构分析及参数优化
 程序开发[J].强度与环境,2017,44(3):25-30.

MA Hao,ZHANG Ya-hui, PIAO Si-yang. Analysis of bolted joints structure for casing and the parameter design program development [J]. Structure & Environment Engineering,2017,44(3):25-30.

- [9] 曹振忠,张 帆,章定国,等.带有安装边螺栓连接结构的机匣 包容能力研究[J].航空学报,2021,42(9):341-355. CAO Zhen-zhong,ZHANG Fan,ZHANG Ding-guo, et al. Containment of aero-engine casing with bolted flanges[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2021,42(9):341-355.
- [10] 郑耀辉,王 江,王明海,等. 薄壁变形机匣件限位检测方法的研究与优化[J]. 机床与液压,2021,49(5):98-101,119.
 ZHENG Yao-hui, WANG Jiang, WANG Ming-hai, et al. Research and optimization of restraint measure method for thin-walled deformed engine casing [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(5):98-101,119.
- [11] 周伟朋,刘仕运. 基于接触分析方法的机匣安装边密封性研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2014,31(4):65-69.
 ZHOU Wei-peng,LIU Shi-yun. Research on the seal performance of aero-engine case flange based on the contact analysis[J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2014,31(4):65-69.
- [12] BEAUDOIN M A, BEHDINAN K. Analytical lump model for the nonlinear dynamic response of bolted flanges in aero-engine casings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115 : 14 - 28.
- [13] 艾延廷,来纯强,郝燕平,等. 航空发动机安装边螺栓连接密 封特性试验[J]. 航空动力学报,2018,33(10):2315-2323.
 AI Yan-ting, LAI Chun-qiang, HAO Yan-ping, et al. Experiment

on sealing characteristics of bolted flanged connections for aeroengines [J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33 (10): 2315-2323.

- [14] 艾延廷,李传喜,田 晶,等. 基于环形板理论的机匣安装边 密封特性分析方法研究[J]. 推进技术,2021,42(2):431-439.
 AI Yan-ting, LI Chuan-xi, TIAN Jing, et al. Sealing characteristics analysis method of casing installation edge based on annular plate theory[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42 (2): 431-439.
- [15] 赵长辉,卢黎波,李文丽,等. 现代喷气战斗机的发动机安装 设计[J]. 航空工程进展,2016,7(2):241-252.
 ZHAO Chang-hui,LU Li-bo,LI Wen-li, et al. Engine installation design of modern jet fighters[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering,2016,7(2):241-252.
- [16] 国 强,刘公博,戚光鑫,等. 某型号航空发动机风扇机匣优 化设计[J]. 沈阳航空航天大学学报,2022,39(2):7-13.
 GUO Qiang,LIU Gong-bo,QI Guang-xin, et al. Optimization design of fan casing for an aeroengine[J]. Journal of Shenyang Aerospace University,2022,39(2):7-13.
- [17] 成大先.机械设计手册:第二卷[M].化学工业出版社,2007.
 CHENG Da-xian. Mechanical design manual: Volume 2[M].
 Chemical Industry Press,2007.

(湛 鑫 编辑)