

TPS 甩油盘端面槽型优化及创新设计

黎旭康¹, 张国渊¹, 吴福章², 梁茂檀¹

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071;
2. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对涡轮动力仿真器现有的端面半圆线槽型甩油盘未能实现对内部循环流场的散热和润滑最大效能的问题, 开展以降低最大流场温度和减弱涡流效应的槽型优化研究。提出了包括抛物线、渐开线、对数螺旋线等槽型新结构, 并探讨了槽深、槽数、螺旋角系数等单一因素对流场特性的影响规律, 采用正交试验法对多因素多目标的槽型结构参数进行了优化。结果表明: 对数螺旋线槽型为一类更能提高润滑和散热的最优结构, 利用正交试验法优化出的一组最优对数螺旋线槽型参数槽深为 6 mm、槽数为 10、螺旋角系数为 0.4, 以此设计了面向更高工况条件下的新型甩油盘结构, 并仿真分析了其在典型工况下的流场特性。

关 键 词: TPS 甩油盘; 端面槽型优化; 流场特性; 多目标优化; 正交试验法

中图分类号: V216.8; TH117.2

文献标志码: A

Optimization and innovative design of surface groove of TPS sling-oil retainer

LI Xukang¹, ZHANG Guoyuan¹, WU Fuzhang², LIANG Maotan¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Owing to failure of existing semi-circular grooved sling-oil retainer in the turbine power simulator to achieve the maximum efficiency of heat dissipation and lubrication of the internal circulating flow field, the parameters' optimization research of the sling-oil retainer for reducing the maximum flow field temperature and the eddy flow effect was carried out. The new groove (including parabola, involute, logarithmic spiral, etc.) structures for the sling-oil retainer were proposed, and the influence of single factor (such as groove depth, groove number and helix angle coefficient) on the flow field characteristics was discussed. The multi-factor and multi-objective parameters were optimized by the orthogonal experiment method. The results showed that the logarithmic spiral groove was an optimal structure that can effectively improve the lubrication and heat dissipation performance, and a set of optimal logarithmic spiral groove parameters by orthogonal experiment method were represented by groove depth of 6 mm, groove number of 10, and helix angle coefficient of 0.4. Based on the results, a new type of sling-oil retainer for more harsh working conditions was designed, and its flow field characteristics under typical working conditions were obtained by the theoretical simulation.

Keywords: TPS sling-oil retainer; surface groove optimization; flow field characteristics; multi-objective optimization; orthogonal experiment method

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(52075407); 陕西省自然科学基金(2019JM-034)

作者简介: 黎旭康(1996—), 男, 硕士生, 主要从事机械结构设计与流体仿真研究。

通信作者: 吴福章(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事动力模拟试验技术研究。E-mail: 690011642@qq.com

引用格式: 黎旭康, 张国渊, 吴福章, 等. TPS 甩油盘端面槽型优化及创新设计[J]. 航空动力学报, 2023, 38(8): 1846-1856. LI Xukang, ZHANG Guoyuan, WU Fuzhang, et al. Optimization and innovative design of surface groove of TPS sling-oil retainer[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(8): 1846-1856.

涡轮动力仿真器(turbine powered simulator, TPS)用甩油盘是一类用于系统轴端可实现流场主动循环及散热的装置。作为一种实现内部流场循环和防止轴承过热的核心功能部件,其结构参数对内部循环流动特性的提高具有显著的影响。但现有关于此类甩油盘对流场作用机理的研究较少,尤其缺少对甩油盘在高转速、复杂工况条件下的流场特性分析与结构参数优化研究。

随着 TPS 试验对象性能需求的提升和工况的日趋复杂,现有的圆弧型端面结构甩油盘已不能最大效能地实现对内部流场的散热及轴承润滑。本文通过优化甩油盘端面结构,进而改善整体 TPS 内部流场特性。面向流场性能提升的端/界面改型及结构参数优化内容的提出源于前期团队对机械密封端面结构的研究^[1-5]。同时,也已有大量的理论和试验结果表明端面改型能够较为显著地改善流体通过固体界面的流动特性。高速运动的流体通过特定结构的通道或者槽型,会产生泵送效应、动压效应以及离心效应等;这些效应构成了封闭流场特性演变的理论机理,在工程应用中以此为基础可进一步设计新结构,可极大地提升整体系统功能。如在特定端面结构对某类机械密封腔流场产生影响的研究方面,蒋小文等^[6]、江锦波等^[7-9]、Zirkelback^[10]、Liu 等^[11]以理论分析为基础,完成了对流体膜全润滑机械密封端环端面的槽型结构优化设计,实现了对密封系统运行性能的提升。江锦波等^[12]提出气体端面密封螺旋槽各几何参数之间交互影响规律所遵循的原则,为不同速度条件下的螺旋槽几何参数优化设计提供了指导。陈源等^[13]分别对比分析了圆弧槽、斜直线槽和超椭圆曲线槽螺旋槽端面结构的机械密封的静、动态特性。作者团队对以全流体润滑的非接触机械密封端面结构改型和性能提升,也进行了大量的研究工作,如提出了浅槽型密封端面结构^[1]、优化了槽型结构参数^[3]、开展了不同槽型下的密封性能试验^[4]、端面涂层改型技术^[5]等,取得了一系列的研究成果,为本文内容的顺利提出奠定了良好的理论和实践基础。基于此,本文以温度场降低,压力场、流速场提升为优化目标,探究 TPS 内部流场在甩油盘不同工况作用下所产生的流场性能变化,并且通过将某实际工程中甩油盘半圆线槽型改为渐开线、抛物线、对数螺旋线槽型等,优化其端面结构,以期得到最优槽型及其结构参数。

在多目标多因素优化研究方面,不同的方法被应用于多目标优化上。丁雪兴等^[14]利用协调函数对螺旋槽气膜刚度与泄漏量之比进行了多目标优化。王斯民等^[15]应用多目标遗传算法在连续响应面的基础上对原缠绕管式换热器结构参数进行优化。文键等^[16]结合动态 Kriging 响应面和遗传算法对板翅式换热器波纹翅片进行了结构优化。Liu 等^[17]使用意愿函数方法对双冷源螺旋盘管管内换热器参数进行了多目标优化。Zhong 等^[18]利用基于 Sobol 方法的全局灵敏度分析方法,结合多目标优化算法对风扇叶片结构进行了优化。上官荣海等^[19]通过对异型冠结构参数的灵敏度分析,制定了涡轮叶片异型冠结构的双目标优化设计流程,实现了对异型冠结构的优化。戴雄等^[20]利用第 2 代非劣排序遗传算法,开展了以机匣等效质量和挂钩处径向平均位移为目标函数的多目标优化。王昌盛等^[21]构建了高超声速轴对称进气道的 Kriging 代理模型并采用第二代非劣排序遗传算法对代理模型进行分析求解,进而提高了气道的性能。程俊杰等^[22]使用非支配排序遗传算法对螺旋桨进行了多目标优化设计。王建磊等^[23]利用正交试验法,优化了动静压机械密封的结构,得到了一组组合槽结构参数,对机械结构优化提供了参考。

分析已有的多目标优化方法,都是以对象特性的最值为优化目标,以对象结构参数为约束条件进行的;其中正交试验法是根据正交性选取全部组合中具有代表性的组合进行试验,在解决多目标优化问题方面已经得到了广泛的应用,它具有分布均匀,代表性强等优点。故本文在研究中采用正交试验法实现对多个单一因素下的多目标参数的优化。

1 模型构建

1.1 几何模型重构

以某甩油盘槽型结构重新进行构型,计算条件如下:转速为 47 000 r/min,轴承为角接触球轴承 7204,受径向载荷为 TPS 自重。现有的半圆线槽型甩油盘在装配体中安装原理与其结构如图 1 所示。图 1 中红色箭头代表流体的循环方向。图 2 为半圆线槽型甩油盘示意图。

图 3 为不同槽型甩油盘。不同的槽型是由不同参数曲线构造所得。本文中,不同参数曲线之间的参数设置以起始半径与终止半径相同原则进

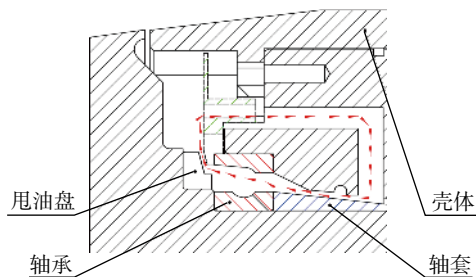


图 1 TPS 安装原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TPS installation

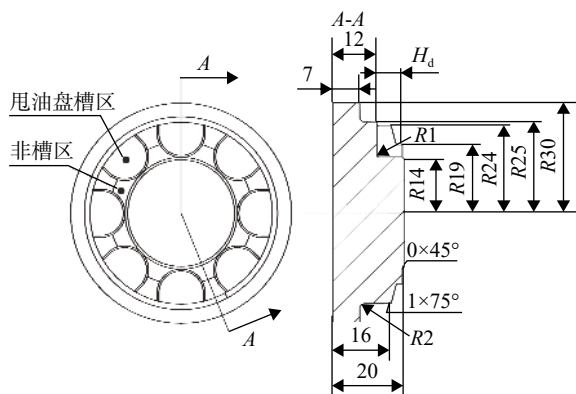


图 2 半圆线槽型甩油盘示意图(单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of semicircular groove type sling-oil retainer (unit: mm)

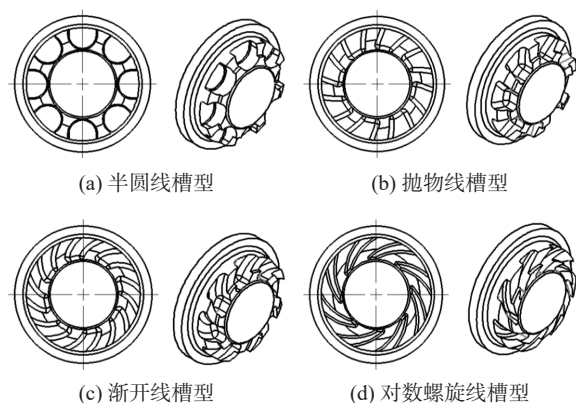


图 3 不同槽型甩油盘

Fig. 3 Different groove types of sling-oil retainer

行设定。在数学上, 各类参数曲线的参数方程如下, 抛物线方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} x = 2pt^2 \\ y = 2pt \end{cases} \quad (1)$$

其中 p 为焦参数, 取 15.2 mm, t 为抛物线起始点之间的周向夹角。

渐开线方程如式(2)所示:

$$\begin{cases} x = r_c \cos \theta + r_c \theta \sin \theta \\ y = r_c \sin \theta - r_c \theta \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中 r_c 为基圆半径即曲线的起始半径, 为 15.2 mm; θ 为渐开线与起始点之间的周向夹角, 运算时单位为弧度。

对数螺旋线方程如式(3)所示:

$$\begin{cases} x = ae^{b\theta} \cos \theta \\ y = ae^{b\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

其中 θ 为对数螺旋线与起始点之间的周向夹角, 起始半径 a 为 15.2 mm, b 为对数螺旋角系数。

甩油盘作用下的流体域剖面如图 4 所示, 其中黄色部分为甩油盘直接作用区域, 红色部分为流体域与轴承摩擦面接触部分; 绿色区域为散热区域; 紫色区域为流体域对称剖切面, 在剖切面上划分出可以表现流场特性的关键节点, 见图 4(b)。图 5 展示了对数螺旋线槽型作用下的流体域模型。

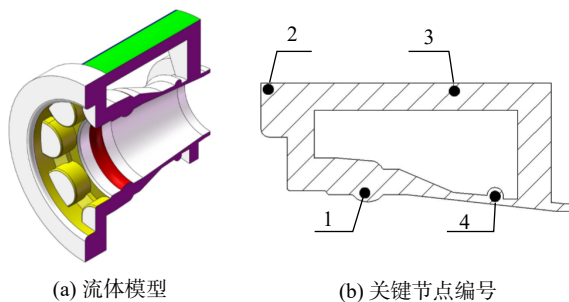


图 4 流体域模型关键节点在截面上的分布

Fig. 4 Distribution of key nodes of fluid domain model on cross section

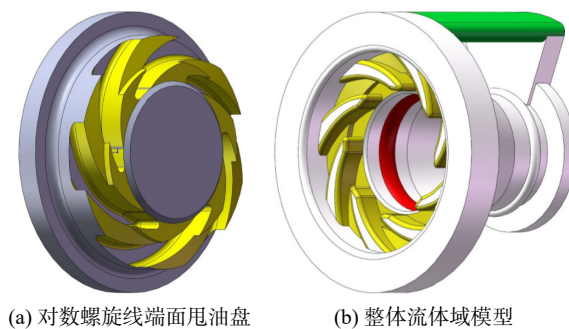


图 5 槽型改型后的流体域模型

Fig. 5 Fluid domain model after groove type modification

1.2 模型边界构建

高速下 TPS 内部流体域流动情况极为复杂, 故选取流体域模型轴对称面作为关键截面进行分析。参考图 4 的流体域关键截面示意图, 在关键截面具有代表性位置设置观测节点, 讨论流场的流动属性等。具体的节点设置如下: 节点 1 为轴承的摩擦生热面参考点, 节点 2 处为动静结

合面密封处参考点, 节点 3 为散热通道处参考点 (更靠近外部环境, 环境温度设置为 27 ℃), 节点 4 为内部流场进口口位置, 也是截面面积最小处。划分出这 4 个关键节点在于流场在这些区域可能产生最高温度、最大压力、最小温度与最大流速, 故在下文重点分析了这 4 个节点的流场特性。

图 4(b) 给出了所有节点在截面的位置示意。

为考察结构参数对 TPS 流场特性的影响, 现针对 47 000 r/min 的典型工况流场特性进行计算。采用 Palmgren 计算方法进行高转速下轴承发热量计算^[24], 并且在考虑甩油盘主动循环的条件下, 计算主动传热系数^[25], 结果如下: 单位面积轴承热流密度为 27 829 W/m², 传热系数为 7 166.7 W/(m²·℃)。表 1 给出了所采用的 7123-89 号润滑油性能参数, 即流体域的材料属性, 其中 ρ 为润滑油的密度, c_p 为润滑油的比定压热容, λ 为热导率, μ 为润滑油的黏度。

表 1 润滑油性能参数

Table 1 Lubricating oil performance parameters

参数	数值
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	865
$c_p/(\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$	2 000
$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	0.138
$\mu/(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$	0.001

2 结果分析与讨论

2.1 不同工况下仿真与试验对比

已有的一组半圆线槽型甩油盘作用下轴承摩擦生热面位置处 (即节点 1 处) 的温度试验结果与仿真结果的对比见图 6 所示。从图 6 可见仿真结果与实测数据之间有较小的误差, 这是因为, 在仿真过程中未考虑流体的泄漏等原因。但总体误差值在一定的范围内 (小于 8%), 故仿真具有一定的准确性。

2.2 甩油盘结构对流场特性的影响规律

2.2.1 不同槽型对 TPS 流场的影响

主轴转速为 47 000 r/min, 槽数为 8, 槽深为 6.8 mm, 4 种不同的槽型对流场温度、压力及流速的仿真结果如图 7~图 9 所示。

如图 7 所示, 半圆线槽型甩油盘最高温度在节点 1 位置, 为 56 ℃; 抛物线、渐开线、对数螺旋线槽型作用下的流体域最高温度分别为 39、41、

35 ℃。相比较于半圆线槽型, 抛物线、渐开线、对数螺旋线 3 种槽型均有较明显降低流场最高温度的效果, 并且有利于增加流场循环速度; 故而在节点 2、节点 3、节点 4 处流场温度分布较为均匀, 变化量较小。

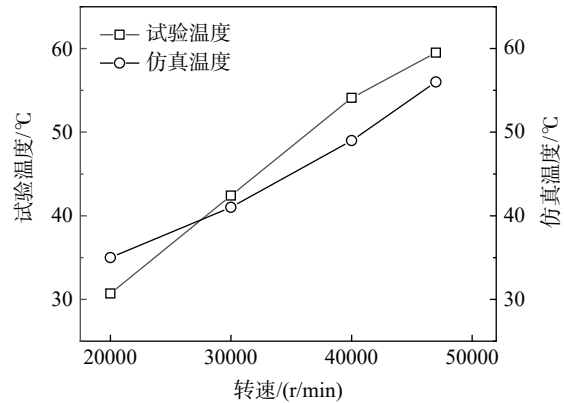


图 6 仿真与试验温度对比

Fig. 6 Temperature comparison of simulation and experiment

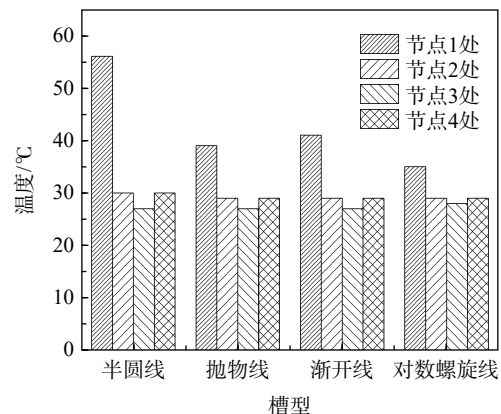
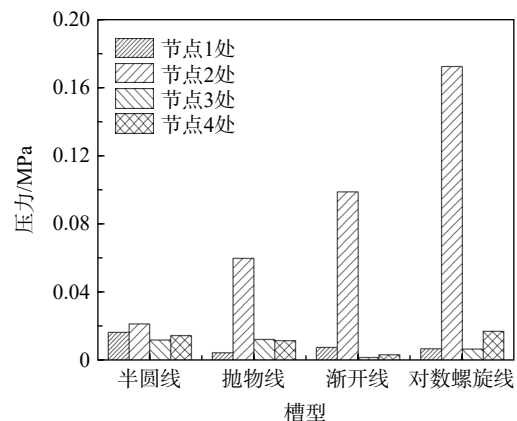


图 7 温度场分布图 (不同槽型)

Fig. 7 Temperature field distribution diagram (different groove types)



(a) 压力分布

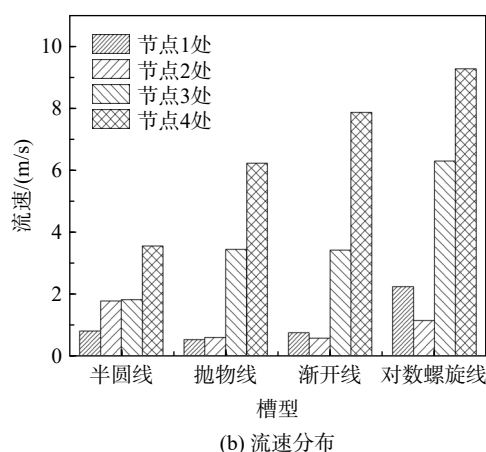


图8 流场压力与流速分布(不同槽型)

Fig. 8 Flow field pressure and velocity distribution diagram (different groove types)

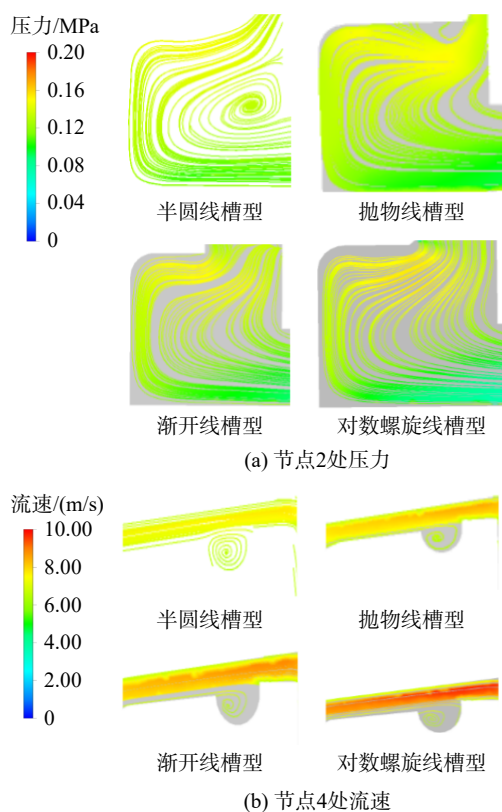


图9 节点2处压力与节点4处流速涡动图(不同槽型)

Fig. 9 Vortex diagram of pressure at node 2 and flow velocity at node 4 (different groove types)

结合图3不同槽型的甩油盘图,槽型由半圆线槽型向抛物线、渐开线、对数螺旋线槽型的演变过程中,曲线的弯曲程度变大,这使得高速工况下流体更易于形成泵送效应。同时,由图8所示流场压力与流速结果和图9所示节点2、节点4处的压力与流速涡动可以看出:节

点2处的压力值也是在对数螺旋线槽型时最大,主要在于受高速离心作用端面槽型结构能明显增强流体的动压效应;节点4处流速最大,这是由于节点4对应的截面积明显减小的原因,且对数螺旋线槽型对流速的增加具有更明显的贡献。

通过上述研究可以看出端面槽型结构的改变能有效地增加整体流场平均流速,加快了内循环的流动,进而使得流场的热量能够被及时带走,使流场内部最高温度降低。对比所有参数曲线槽型,可以看出对数螺旋线槽型对流场的影响效果最为明显,故在下文着重研究对数螺旋线槽型作用下的其他结构参数对流场的影响。

2.2.2 不同槽数的对数螺旋线槽型对流场特性的影响

在主轴转速为47 000 r/min、槽深为6.8 mm、相同螺旋角系数条件下,对槽数为6、8与10的对数螺旋线槽型作用下的流场进行仿真,在槽数改变的过程中保证槽区面积与非槽区面积比为1:1,仿真结果如图10~图12。

如图10所示,槽数为6的对数螺旋线槽型作用下流场最高温度为36℃左右,基本与槽数为8和10作用下的35℃与36.5℃持平,据此可以看出,槽数的变化对流场最高温度的影响较小。并且从相同槽数作用下节点2、节点3、节点4处温度可以看出整体流场的温度分布较为均匀。

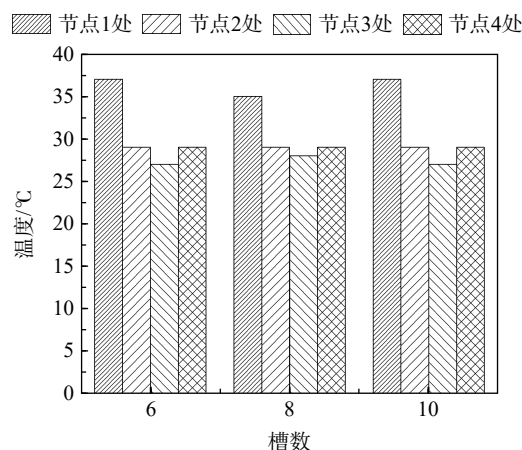


图10 温度场分布图(不同槽数)

Fig. 10 Temperature field distribution diagram (different groove numbers)

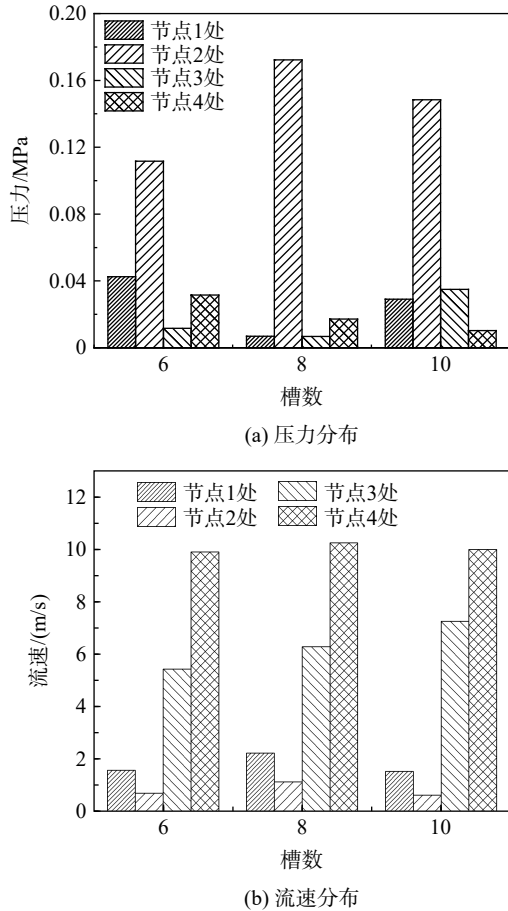


图 11 流场压力与流速分布(不同槽数)

Fig. 11 Flow field pressure and velocity distribution diagram (different groove numbers)

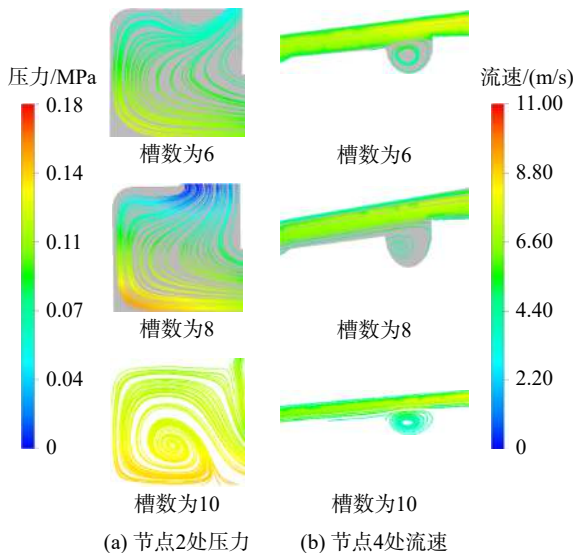


图 12 节点 2 处压力与节点 4 处流速涡动图(不同槽数)

Fig. 12 Vortex diagram of pressure at node 2 and flow velocity at node 4 (different groove numbers)

结合图 11 不同节点流场的压力与流速大小与图 12 节点 2、节点 4 处流场涡动变化来看,

槽数为 8 的对数螺旋线槽型作用下的流场压力与流速最大,这是由于在保证甩油盘槽区面积与非槽区面积 1:1 的条件下,当槽数为 8 时,甩油盘所能产生的流场泵送效应相比较于槽数为 6 和 10 的甩油盘所能产生的泵送效应有较小的提升,可以对流场的循环散热能力有小幅加强。

2.2.3 不同槽深的对数螺旋线槽型对流场特性的影响

在转速为 47 000 r/min,槽数为 6,螺旋角系数为 0.4 的条件下,仿真不同槽深的对数螺旋线槽型甩油盘作用下的流场,结果如图 13~图 15 所示。

如图 13 所示,槽深的变化对流场温度的影响较小,流场最高温度随槽深的变化为 36、34、36、35 °C。其中,当槽深为 6 mm,即约为总槽厚度的一半时,流场出现最小温度为 34 °C。

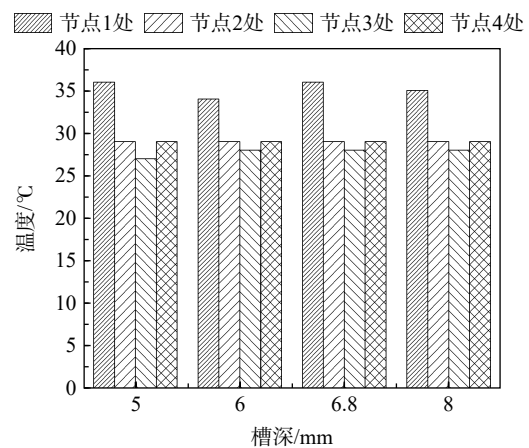
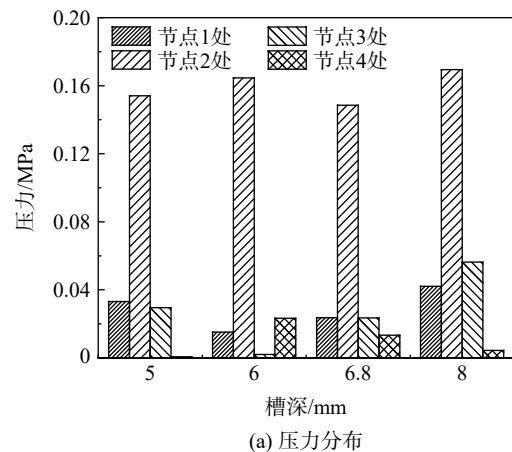


图 13 温度场分布图(不同槽深)

Fig. 13 Temperature field distribution diagram (different groove depths)



(a) 压力分布

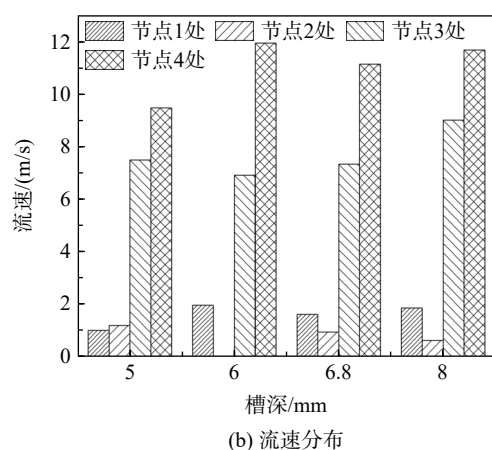


图 14 流场压力与流速分布图(不同槽深)

Fig. 14 Flow field pressure and velocity distribution diagram (different groove depths)

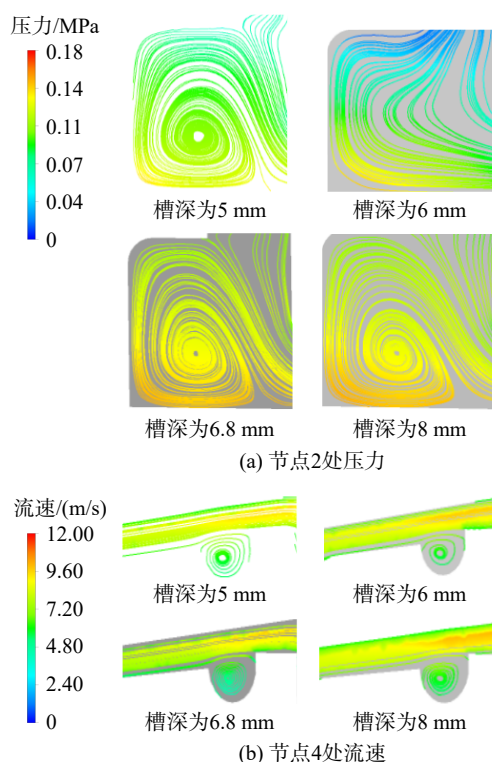


图 15 节点 2 处压力与节点 4 处流速涡动图(不同槽深)

Fig. 15 Vortex diagram of pressure at node 2 and flow velocity at node 4 (different groove depths)

结合图 14 可以看出流场的最大压力与最大流速在槽深的变化过程中的变化量也较小;在槽深为 5、6.8、8 mm 时,节点 2、节点 4 处产生了较明显的涡流,如图 15 所示,但是在槽深为 6 mm 时,节点 2、节点 4 处流场的涡流较小,流体循环所需能量耗散较少,这有利于流场的循环散热。

2.2.4 不同螺旋角系数的对数螺旋线槽型对流场特性的影响

图 16 所示为不同螺旋角系数下的对数螺旋

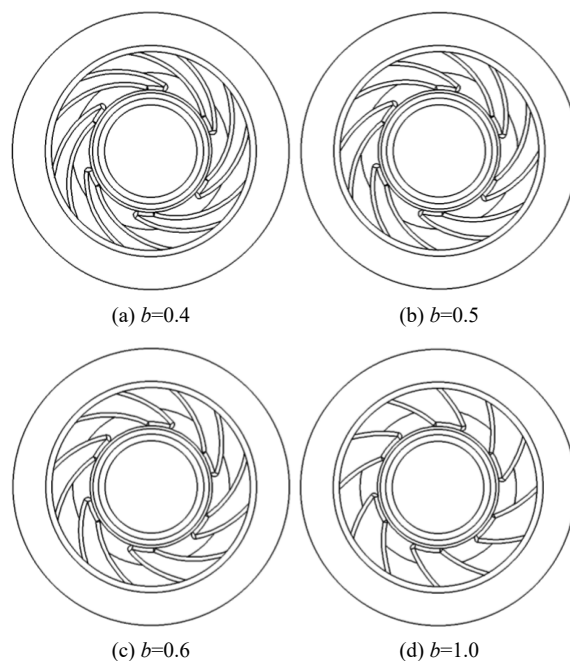


图 16 不同螺旋角系数下的对数螺旋线槽型

Fig. 16 Logarithmic spiral groove with different helix angle coefficients

线槽型,可以看出随着螺旋角系数的增大,槽型曲线的弯曲程度减小。

在转速为 47 000 r/min,槽数为 6,槽深为 6.8 mm 时,通过改变对数螺旋线的螺旋角系数来改变甩油盘槽型,进而对其作用下的流场进行仿真,观察流场的特性变化,如图 17~图 19 所示。

如图 17 所示,螺旋角系数的改变对流场最高温度有一定的影响,较小螺旋角系数的对数螺旋线槽型甩油盘对流场最高温度的降低效果较好,如螺旋角系数在 0.4、0.5、0.6 时,三者的最高温度相差较小,分别为 36、35、35 °C;但是当螺旋角系

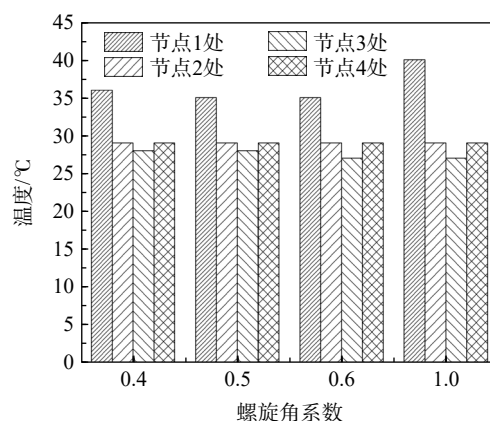


图 17 温度场分布图(不同螺旋角系数)

Fig. 17 Temperature field distribution diagram (different helix angle coefficients)

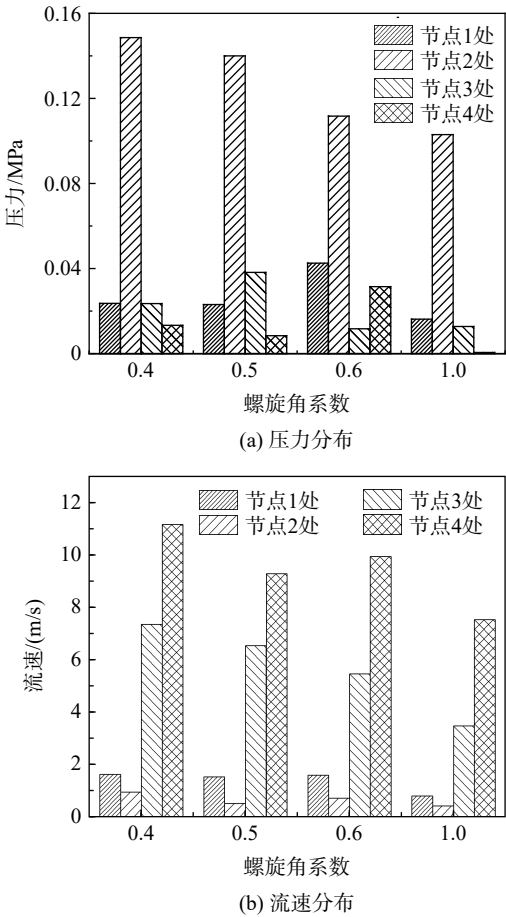


图 18 流场压力与流速分布图(不同螺旋角系数)
Fig. 18 Flow field pressure and velocity distribution diagram
(different helix angle coefficients)

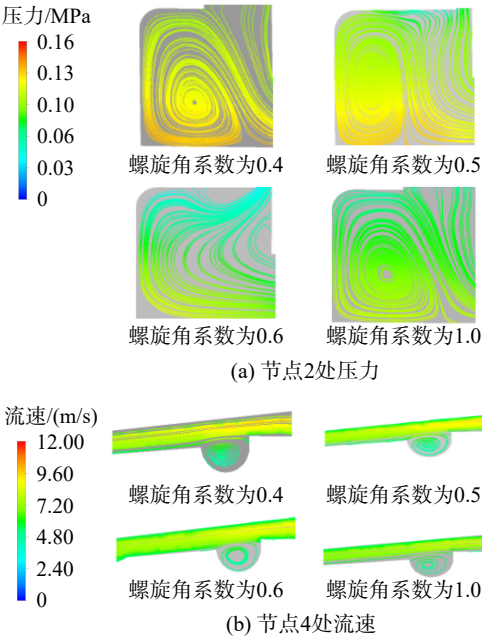


图 19 节点 2 处压力与节点 4 处流速涡动图
(不同螺旋角系数)
Fig. 19 Vortex diagram of pressure at node 2 and flow velocity
at node 4 (different helix angle coefficients)

数为 1 时, 流场内部最高温度为 40 ℃, 出现了较高的提升。这是由于随着螺旋角系数的增大, 对数螺旋线的弯曲程度减小, 泵送效应减弱, 影响了流场的循环效果, 最终导致了流场的最高温度上升。

图 18 与图 19 所体现的压力与流速的变化也可以看出在螺旋角系数较小时, 流场所产生的压力与流速较大, 这使得流场的循环加快, 可以有效地带走摩擦所产生的热量, 从而降低流场的最高温度。

就单一要素下对流场的影响效果来看, 不同类型的曲线槽型对流场特性影响最大, 其他因素对流场的影响较小。但是以上都是在考虑单一要素变化的条件下, 流场特性的变化, 不能全面地反映所有要素对流场的影响。基于此, 必须考虑多因素影响下的流场变化。

3 基于多目标正交试验法的参数优化

流场特性的改变是基于多重要素的共同作用, 研究单一影响因素对流场特性的改变具有局限性, 为使设计更为科学化, 应综合分析多因素对流场性能产生的影响。正交试验是一种研究多因素多水平的设计方法, 根据正交性选取全部组合中具有代表性的组合进行试验, 在解决多目标优化问题方面已经得到了广泛的应用; 在正交试验法的进行过程中, 对各方案结果进行极差分析及方差分析后, 可以得到改善流场特性的最优组合。本文针对实际工程对象所受的空间结构尺寸限制和满足性能需求目标, 设计 3 因素 4 水平的 L16(4³) 正交试验。试验因素为曲线槽型、槽数、槽深 3 项; 各因素的水平区间如下: 曲线槽型为半圆线槽型、渐开线槽型、抛物线槽型、对数螺旋线槽型 4 项, 槽数为 6、8、10、12, 槽深为 4、5、6、6.8 mm, 形成的正交试验表如表 2 所示。

试验因素	符号	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
槽型	A	半圆线	抛物线	渐开线	对数螺旋线
槽深/mm	B	4	5	6	6.8
槽数	C	6	8	10	12

通过极差分析方法计算得到第 j 列因素 m 水平对应的试验指标 K_{jm} 、 K'_{jm} 的平均值 k_{jm} 及第 j 列因素的极差 R_j 。其中 K_{jm} 的大小可以判断 j 因素的优水平和各因素的水平组合, 即最优组合。 k_{jm}

反映了其他条件相同时,不同因素 m 水平对优化目标影响的大小。 R_j 反映了优化随着第 j 列因素发生变化而产生的变化幅度,变化幅度越大则该因素对优化目标的影响越大,即该因素更重要。 R_j 的计算公式如式(4)所示。

$$R_j = \max(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}) - \min(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}) \quad (4)$$

由于流场的最高温度与流场的循环能力呈现正相关的作用关系,而流场的循环能力可以由内部流场的压差值来体现,故在正交试验中以最高温度与最大压差作为对甩油盘槽型优化性能的评判标准。最高温度和最大压差进行极差分析的计算结果如表 3 所示。通过表 3 分别可以得到针对最高温度及最大压差的主次顺序、优水平与优组合。

表 3 正交试验的试验方案及计算结果
Table 3 Test scheme and calculation result of orthogonal test

试验 序列	试验方案			计算结果	
	槽型	槽深/mm	槽数	最高温度/℃	最大压差/Pa
1	半圆线	4	6	40.5	124 350
2	半圆线	5	8	49	28 600
3	半圆线	6	10	40.2	110 870
4	半圆线	6.8	12	53	68 970
5	抛物线	4	10	37.5	144 260
6	抛物线	5	12	45	192 340
7	抛物线	6	6	36.5	125 580
8	抛物线	6.8	8	37	95 940
9	渐开线	4	8	39	149 810
10	渐开线	5	6	34.3	198 170
11	渐开线	6	12	40.5	61 530
12	渐开线	6.8	10	35.5	122 169
13	对数螺旋线	4	12	35	283 470
14	对数螺旋线	5	10	33.5	299 380
15	对数螺旋线	6	8	34.2	254 280
16	对数螺旋线	6.8	6	36	219 270

表 4 为最高温度的极差分析,其中 $K_m(m=1, 2, 3, 4)$ 表示因素 A 在水平为 m 时性能指标计算值之和; $k_m = K_m/4$ 。根据极差 R 可确定因素的主次顺序为 $A > C > B$,其中槽型曲线的变化对流场最高温度的降低效果最为明显,这是由于参数曲线弯曲程度的变化对流场的循环效果有较强的改善作用,从而使得流场内部温度能够较快地降低。

根据极差 R 可以看出槽深与槽数对流场最高温度的影响相对较小。这是因为槽深在毫米级别

表 4 最高温度极差分析
Table 4 Maximum temperature range analysis

试验指标	参数	槽型 A	槽深 B	槽数 C
最高温度/℃	K_1	182.7	152	147.3
	K_2	156	161.8	159.2
	K_3	149.3	151.4	146.7
	K_4	138.7	161.5	161.5
	k_1	45.66	38	36.83
	k_2	39	40.45	39.8
	k_3	37.33	37.85	36.68
	k_4	34.68	40.38	40.38
	极差 R	11	2.6	3.7
	主次顺序	$A > C > B$		
优水平		A_4	B_3	C_3
优组合		$A_4 B_3 C_3$		

的范围内对流场的影响有限,但是能够存在最优值;槽数对流场的最高温度与槽深影响效果相近,这是因为在槽数的增加下流场的涡动效应会增强,导致流体循环效率降低,流场散热效果减弱。由于要求最高温度尽可能小,可确定以最高温度为目标的优组合为 $A_4 B_3 C_3$,即在其他条件相同时,甩油盘槽型参数如下:槽型为对数螺旋线槽型,槽深为 6 mm,槽数为 10 个。此时流场温度最低。

表 5 为最大压差的极差分析,根据极差 R 可确定因素的主次顺序为 $A > B > C$ 。由于要求压差较大,可确定以压差为目标的优组合为 $A_4 B_2 C_3$,即在其他条件相同时,甩油盘槽型参数如下:槽型为对数螺旋线槽型,槽深为 5 mm,槽数为 10 个。此时流场压差最大。

表 5 最大压差极差分析
Table 5 Maximum differential pressure range analysis

试验指标	参数	槽型 A	槽深 B	槽数 C
最大压差/Pa	K_1	332 790	701 890	667 370
	K_2	558 120	718 490	528 630
	K_3	531 679	552 260	676 679
	K_4	1 056 400	506 349	606 310
	k_1	83 197.5	175 472.5	166 842.5
	k_2	139 530	179 622.5	132 157.5
	k_3	132 919.75	138 065	169 169.75
	k_4	264 100	126 587	151 577.5
	极差 R	180 902.5	53 035.25	37 012.25
	主次顺序	$A > B > C$		
优水平		A_4	B_2	C_3
优组合		$A_4 B_2 C_3$		

以最高温度与最大压差为目标函数可以看出, 两组结果对槽型与槽数的最优值相同, 槽深的取值不同, 根据不同的设计要求对结构参数选型。进一步对最高温度与压差进行计算, 得到两组参数的最高温度差别不是很大, 以最大压差进行比较, 另一组的最大压差较大, 因此以最大压差作为目标函数的优化参数作为最优解。

图 20 与图 21 为不同水平与流场特性之间的关系。从图 20 可以看出最高温度随着因素 A 在水平的变化过程中呈现下降趋势, 随因素 B 、 C 在水平的变化过程中呈现先上升、再下降、再上升、再下降的变化, 但是变化范围较小。从图 21 可以看出流场压差随因素 A 在水平的变化过程中呈现先上升、再小幅度下降、再大幅度上升的趋势, 随因素 B 在水平的变化过程中呈现持续下降的变化趋势, 随因素 C 在水平的变化过程中有先下降、再上升、再下降的影响趋势, 但是因素 B 、 C

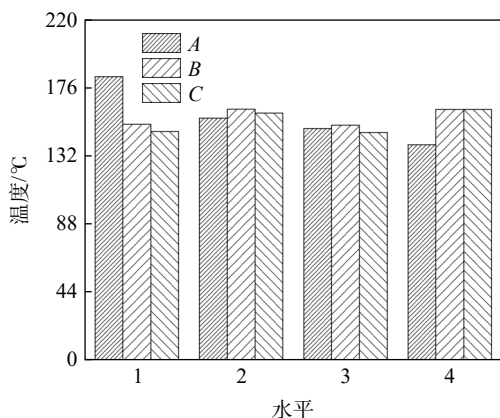


图 20 不同水平与最高温度的关系

Fig. 20 Relationship between different levels and maximum temperature

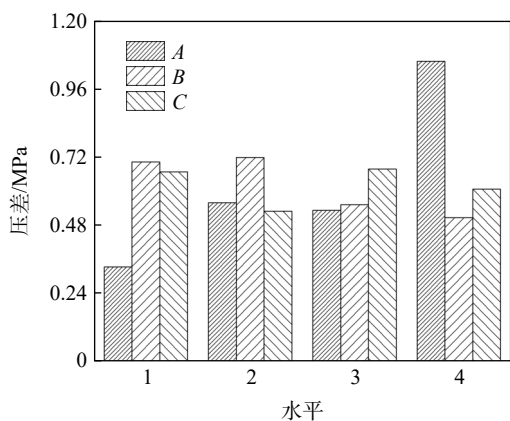


图 21 不同水平与压差的关系

Fig. 21 Relationship between different levels and pressure difference

在水平的变化过程中对流场的压差影响相对较小。

最后, 再通过对得到的对数螺旋线槽型在螺旋角系数单因素影响下进行选型, 得到当槽深为 6 mm, 槽数为 10, 螺旋角系数为 0.4 时, 优化后的甩油盘结构如图 22 所示。

图 22 中, 白色区域为槽区部分, 蓝色区域为非槽区部分, 绿色区域为甩油盘主体, 红色部分为与甩油盘连接轴部分。在此甩油盘结构作用下, 流场的最高温度较小, 为 33 ℃, 压差较大, 为 331 702.5 Pa, 流场特性较优。

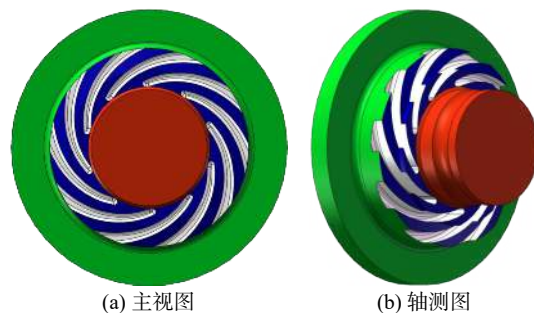


图 22 优化后的甩油盘槽型

Fig. 22 Groove type of sling-oil retainer after optimization

4 结 论

1) 在单一要素改变作用下, 对比了不同参数曲线槽型甩油盘对流场的影响, 抛物线、渐开线、对数螺旋线槽型甩油盘相比较于半圆线槽型甩油盘, 对流场有较好的改善效果, 具体表现为抛物线、渐开线、对数螺旋线槽型甩油盘可以使得流场循环过程加快, 从而使得流场最高温度降低。

2) 对数螺旋线槽型甩油盘对流场温度的影响最大, 并且槽数、槽深、螺旋角系数的改变对流场温度在一定范围内有较好的改善效果。

3) 通过正交试验法, 得到了一组针对特定结构限制下的 TPS 甩油盘对数螺旋线槽型, 当其槽深为 6 mm, 槽数为 10, 螺旋角系数为 0.4 时, 流场温度最小, 为 33 ℃, 最大压差为 331 702.5 Pa, 内循环流场特性能得到了较好的提升。

参考文献:

- [1] 张国渊. 浅槽式螺旋槽密封性能数值研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
ZHANG Guoyuan. Numerical research of the narrow spiral groove seal performance[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [2] 张国渊, 袁小阳, 赵伟刚, 等. 螺旋槽端面密封脱开转速的理论及实验研究[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 55-60.
ZHANG Guoyuan, YUAN Xiaoyang, ZHAO Weigang, et al. Theo-

- retical and experimental research on the disengagement speed of spiral groove end face seal[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(8): 55-60. (in Chinese)
- [3] 张国渊, 陈国忠, 赵伟刚, 等. 高速低温动静结合型机械密封结构优化及运转试验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(5): 1093-1102.
- ZHANG Guoyuan, CHEN Guozhong, ZHAO Weigang, et al. Optimization and test of parameters of the cryogenic hydrodynamic mechanical seal[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(5): 1093-1102. (in Chinese)
- [4] ZHANG Guoyuan, ZHAO Yangyang, ZHAO Weigang, et al. An experimental study on the cryogenic face seal at different inlet pressures[J]. *Journal of Engineering Tribology*, 2020, 234(9): 1470-1481.
- [5] ZHAO Weigang, ZHANG Guoyuan, DONG Guangneng, et al. Friction and wear behavior of different seal materials under water-lubricated conditions[J]. *Friction*, 2021, 9(4): 697-709.
- [6] 蒋小文, 顾伯勤. 螺旋槽干气密封端面间气膜特性[J]. *化工学报*, 2005(8): 1419-1425.
- JIANG Xiaowen, GU Boqin. Characteristic of gas film between spiral groove dry gas seal faces[J]. *Journal of Chemical Industry*, 2005(8): 1419-1425. (in Chinese)
- [7] JIANG J B, PENG X D, LI J Y, et al. A comparative study on the performance of typical types of bionic groove dry gas seal based on bird wing[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13(2): 234-244.
- [8] 江锦波, 彭旭东, 白少先, 等. 仿生集束螺旋槽干式气体密封特性的数值分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(15): 20-26.
- JIANG Jinbo, PENG Xudong, BAI Shaoxian, et al. Numerical analysis of characteristics of a bionic cluster spiral groove dry gas seal[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(15): 20-26. (in Chinese)
- [9] 江锦波, 彭旭东, 白少先, 等. 仿鸟翼微列螺旋槽干气密封性能分析与选型[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(3): 274-281.
- JIANG Jinbo, PENG Xudong, BAI Shaoxian, et al. Performance analysis and selection of a bionic bird wing multi-array spiral groove dry gas seal[J]. *Journal of Tribology*, 2015, 35(3): 274-281. (in Chinese)
- [10] ZIRKELBACK N. Parametric study of spiral groove gas face seals[J]. *Tribology Transactions*, 2000, 43(2): 337-343.
- [11] LIU Y C, SHEN X M, XU W F, et al. Performance comparison and parametric study on spiral groove gas film face seals[J]. *Science in China: Series G Physics, Mechanics and Astronomy*, 2004(1): 29-36.
- [12] 江锦波, 陈源, 赵文静, 等. 干气密封螺旋槽几何参数优选交互影响[J]. *化工学报*, 2018, 69(4): 1518-1527.
- JIANG Jinbo, CHEN Yuan, ZHAO Wenjing, et al. Interaction effect of optimized value of geometric parameters of spiral groove of dry gas seal[J]. *Journal of Chemical Industry*, 2018, 69(4): 1518-1527. (in Chinese)
- [13] CHEN Y, JIANG J B, PENG X D. Dynamic characteristics and transient sealing performance analysis of hyperelliptic curve groove dry gas seals[J]. *Tribology International*, 2017, 116: 217-228.
- [14] 丁雪兴, 陈德林, 张伟政, 等. 螺旋槽干气密封微尺度流动场的近似计算及其参数优化[J]. *应用力学学报*, 2007(3): 425-428, 506-507.
- DING Xuexing, CHEN Delin, ZHANG Weizheng, et al. Approximate calculation and parameters optimization for micro-scale flow field in spiral grooved gas seals[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2007(3): 425-428, 506-507. (in Chinese)
- [15] 王斯民, 简冠平, 肖娟, 等. 缠绕管式换热器结构参数多目标优化数值模拟研究[J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(5): 9-15.
- WANG Simin, JIAN Guanping, XIAO Juan, et al. Numerical simulation research on multi-objective optimization of structural parameters of wound tube heat exchanger[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(5): 9-15. (in Chinese)
- [16] 文键, 王春龙, 刘华清, 等. 板翅式换热器波纹翅片性能数值模拟及其优化[J]. *高校化学工程学报*, 2020, 34(2): 335-341.
- WEN Jian, WANG Chunlong, LIU Huaqing, et al. Numerical simulation and optimization on performance of wavy fins in plate-fin heat exchangers[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2020, 34(2): 335-341. (in Chinese)
- [17] LIU Shaobei, HUANG Weixing, BAO Zewei, et al. Analysis, prediction and multi-objective optimization of helically coiled tube-in-tube heat exchanger with double cooling source using RSM[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 159: 106568.1-106568.15.
- [18] ZHONG Yinhuai, LI Yinong, LI Peiran, et al. Blade structure design based on multi-objective optimization of automotive fan[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1952(3): 032022.1-032022.10.
- [19] 上官荣海, 郝艳华, 黄致建. 涡轮叶片异型冠结构优化设计[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(2): 313-319.
- SHANGGUAN Ronghai, HAO Yanhua, HUANG Zhijian. Structural optimization design of turbine blade with special-shroud[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(2): 313-319. (in Chinese)
- [20] 戴雄, 关玉璞, 赵振华, 等. 高压涡轮机匣热固耦合下多目标优化方法[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(8): 1992-1999.
- DAI Xiong, GUAN Yupu, ZHAO Zhenhua, et al. Multi-objective optimization method for high pressure turbine casing based on thermal-structure coupling analysis[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(8): 1992-1999. (in Chinese)
- [21] 王昌盛, 额日其太, 丁文豪. 高超声速轴对称进气道多目标优化设计[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(7): 1392-1401.
- WANG Changsheng, Eriqitai, DING Wenhao. Multi-objective optimization design of hypersonic axisymmetric inlet[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(7): 1392-1401. (in Chinese)
- [22] 程俊杰, 王海峰, 尚玲玲, 等. 一种高空飞艇螺旋桨结构多目标优化设计方法[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(3): 584-591.
- CHENG Junjie, WANG Haifeng, SHANG Lingling, et al. Multi-objective optimization design method for propeller structure of a high-altitude airship[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(3): 584-591. (in Chinese)
- [23] 王建磊, 门川皓, 赵伟刚, 等. 动静压机械密封的结构设计及端面槽型优化研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(9): 108-117.
- WANG Jianlei, MEN Chuanhao, ZHAO Weigang, et al. Research on structural design and end face slot of optimization of hydrodynamic and hydrostatic mechanical seal[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(9): 108-117. (in Chinese)
- [24] PALMGREN A. Ball and roller bearing engineering[M]. Philadelphia, US: SKF Industries Inc., 1945.
- [25] CRECELIUS W J, PIRVICS J. Computer program operation manual on SHABERTH: a computer program for the analysis of the steady state and transient thermal performance of shaft bearing systems[R]. Tallahassee, US: Air Force Aero Propulsion Laboratory, 1976.