

文章编号: 1000-8055(2008)04-0759-06

一种低迟滞低磨损的指尖密封型线构形的研究

李二圣, 陈国定

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 针对迄今指尖密封多目标性能优化研究中存在的难以实现迟滞性能和磨损性能同步改善的问题, 通过引入 Stackelberg 对策理论, 并将指尖密封型线构形作为优化“元素”, 构建了指尖密封迟滞性能和磨损性能优化的 Stackelberg 模型. 在正向 Stackelberg 主从对策机制下, 采用基于有限元仿真和 BP 神经网络的遗传算法在 Stackelberg 系统主从层面上实现了指尖密封性能的可控优化, 获得了具有低迟滞低磨损性能的“上凹”构形指尖密封型线. 有限元仿真分析合理解释了“上凹”型线指尖密封具有较好性能的原因, 表明“上凹”型线指尖密封具有良好的应用前景.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 指尖密封; Stackelberg 对策; 多目标优化; 上凹型线; BP 神经网络; 遗传算法

中图分类号: V233 4

文献标识码: A

Study on a new shape-curve of finger seal with low-hysteresis and low-wear

LI Er-sheng, CHEN Guo-ding

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Considering the present unsolved problem of improving hysteresis and wear in multi-objective optimization of finger seal, Stackelberg theory is introduced to construct finger seal mathematical model with hysteresis and wear characteristics by treating curve as elements to be optimized. With the lead-follow Stackelberg game mechanism, the controllable optimization of finger seal characteristics is performed based on genetic algorithm combined with backward propagation (BP) network and finite element analysis (FEA) methods. Then the finger seal of up-concave curve with low hysteresis and wear characteristics is obtained. Finally, the FEA simulation reasonably explains to reason that this type of finger seal has the better characteristics and also show its future in engineering field.

Key words: aerospace propulsion system; finger seal; stackelberg game; multi-objective optimization; up-concave curve; BP neural network; genetic algorithm

指尖密封作为一种具有燃气轮机气路密封应用背景的新型密封技术, 近年来在国内外得到了较为广泛的关注和研究. 指尖密封工作时存在的迟滞和磨损问题是制肘其密封性能和使用寿命提高的两个关键因素, 因而改进指尖密封的结构

和参数, 进而改善其迟滞性能和磨损性能, 一直是近几年指尖密封研究工作的重点所在^[1-4].

尽管已经知道指尖密封型线是影响指尖密封性能的重要因素, 但迄今的研究还是局限于对数螺线和渐开线等具有“上凸”构形特征型线的指尖

收稿日期: 2007-04-10; 修订日期: 2007-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(50575182); 航空科学基金(05C53056); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060699021)

作者简介: 李二圣(1983), 男, 安徽蒙城人, 硕士生, 主要从事润滑与密封技术的研究.

密封结构尺寸的优化分析^[5-6], 这种优化研究对指尖密封性能的改善程度较为有限, 也没有出现指尖密封迟滞性能和磨损性能能够同步改善的情形. 指尖密封常规优化方法的局限性使得优化设计无法考虑型线构形的影响, 并因之可能是指尖密封迟滞性能和磨损性能难以同步改善的原因. 因此, 寻求能够考虑型线构形影响的指尖密封优化技术, 并籍此实现指尖密封迟滞性能和磨损性能的同步提高, 是十分有意义的研究工作.

有鉴于此, 本文尝试将 Stackelberg 对策理论引入到指尖密封性能优化研究中, 力图将型线构形特征作为优化“元素”, 探索能够实现低迟滞低磨损的指尖密封型线构形. 本文通过建立指尖密封性能优化的 Stackelberg 对策模型, 基于有限元仿真试验和 BP 神经网络的遗传算法在 Stackelberg 主从层面上的可控优化, 获得了性能较为优良的“上凹”型线指尖密封结构. 数值仿真工作表明, “上凹”型线指尖密封对工况条件具有较好的普适性, 并能够实现指尖密封迟滞性能和磨损性能的同步改善, 是一种很有前途的指尖密封结构形式.

1 基于 Stackelberg 对策理论的指尖密封性能优化技术

1.1 Stackelberg 对策理论

Stackelberg 对策系统是一种主从递阶结构的系统^[7-8], 对于两个决策者的 Stackelberg 系统来讲, 居于高层的决策者称为主方, 居于低层的决策者称为从方. 在决策过程中主方和从方采用自上而下决策顺序的正向 Stackelberg 对策机制. 在各轮决策过程中, 主方根据从方的上轮决策, 搜寻使其目标达到最优的决策, 知会从方并影响从方的目标函数与约束集; 从方则在了解了主方决策的前提下, 也搜寻使其目标达到最优的决策, 其后同样告知主方, 从方的决策同样也会影响主方的目标函数与约束集. 类似这样的决策轮次多次重复, 直到主方的目标函数达到最优为止. 在 Stackelberg 对策系统中, 主方比从方有更大的权利, 并力图使自身利益得到充分的保证; 从方需服从于主方, 并在此基础上也尽量使自身的利益最大化.

1.2 指尖密封性能优化的 Stackelberg 模型

应用 Stackelberg 对策理论求解指尖密封多目标优化问题, 需要将各优化目标确定为不同的对策方以及确定他们的主从地位, 并将设计变量

集合分解为各对策方所控制的策略子集. 通过各对策方之间的相互竞争、相互协作的对策选择过程, 实现各对策方的相应得益, 并在宏观层面上实现指尖密封系统的优化平衡.

实际工程应用中的指尖密封由于所处密封位置的不同和工况条件的差异, 对密封性能(通过迟滞率表征)和磨损寿命(通过接触压力表征)可能有不同的优先要求. 作为不影响技术方法研究的一种处理, 在指尖密封性能优化的 Stackelberg 模型中, 迟滞率 ε 最小作为主方的优化目标, 平均接触压力 p_m 最小作为从方的优化目标. 设计变量集合在各对策方之间的分配, 则以各设计变量对优化目标的灵敏程度大小为原则来实施. 根据相关研究工作^[2], 指尖密封型线作为主方(迟滞率 ε)的控制变量, 指尖片轴向尺寸和指尖梁数目作为从方(平均接触压力 $\bar{p}_m$)的控制变量.

根据指尖密封实际应用中的不同情况, 指尖片轴向尺寸 z 的取值范围限制在 0.05 mm 到 0.2 mm 之间, 指尖梁数目 n 则因加工和装配的方便, 有 60、63、72 和 90 等若干离散数据可供选择. 考虑将来指尖密封结构加工方便, 本文采用二次 Bezier 曲线描述指尖密封型线, 给定曲线起始点 $p_0(x_0, y_0)$ 和终止点 $p_2(x_2, y_2)$, 在型线优化过程中这两点的位置保持不变, 只将中间点 $p_1(x, y)$ 作为优化调整控制点, 通过改变 p_1 点的位置来对整条曲线的形状进行控制和调整, 以实现指尖密封性能的综合优化. 以满足指尖密封型线加工成型的要求确定 p_1 的横坐标 x , 而将 p_1 的纵坐标 y 作为优化设计变量, 且其变化范围在 29.25 mm 到 39 mm 之间.

依据上述分析处理, 提出如下指尖密封性能优化的 Stackelberg 模型

$$\begin{cases} \min_y \varepsilon(y, z, n) \\ \text{s. t. } y \in [29.25 \text{ mm}, 39 \text{ mm}] \\ \begin{cases} \min_{z, n} \bar{p}_m(y, z, n) \\ \text{s. t. } z \in [0.05 \text{ mm}, 0.2 \text{ mm}], \\ n \in \{60, 63, 72, 90\} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

1.3 指尖密封性能优化 Stackelberg 模型的求解技术

依据正向 Stackelberg 主从对策机制, 指尖密封性能优化 Stackelberg 模型中的主方(迟滞率 ε)和从方(平均接触压力 $\bar{p}_m$)在其各自层面上以其最小作为目标进行优化分析, 可以利用单目标优

化方法自上而下顺次进行单独求解。

但是, 由于指尖密封几何结构的复杂性和工况条件的多样性, 优化目标函数 ε 和 $\bar{p}_m$ 难以设计变量的显函数形式进行表征, 一般的优化方法难以采用。因此, 本文提出在 Stackelberg 系统主从层面上, 基于 BP 神经网络构建指尖密封性能和设计变量之间的映射规律, 利用遗传算法对神经网络的输出进行全局寻优, 以实现各层面上的单目标优化分析。BP 神经网络是经过大量有限元仿真计算获得的样本的训练后建立的。

在每一轮优化计算中, 主方迟滞率 ε 在从方平均接触压力 $\bar{p}_m$ 决策不变的条件下, 在上层采用基于有限元仿真试验和 BP 神经网络的遗传算法搜寻使其达到最小的策略, 并将自己的决策告知平均接触压力决策方; 平均接触压力决策方在获取迟滞率决策方的决策后, 同样在下层采用基于有限元仿真试验和 BP 神经网络的遗传算法搜寻使其达到最小的策略, 并同时将其决策反馈给迟滞率决策方。最后由迟滞率决策方(主方)判断是否终止优化计算。如果终止优化计算, 则输出 Stackelberg 对策平衡解, 否则进行下一轮优化计算。

2 指尖密封优化计算实例

如图 1 所示, 在指尖密封结构参数取表 1 所示数值、以及当指尖密封装置上下游压差 $\Delta p = 0.5 \text{ MPa}$ 和转子径向跳动量 $\Delta r = 0.12 \text{ mm}$ 的情况下, 采用 Stackelberg 优化模型进行了指尖密封性能优化计算, 经过 11 轮优化迭代后获得了指尖密封性能优化 Stackelberg 对策平衡解。具体的优化结果是: 指尖片轴向尺寸 $z = 0.198 \text{ mm}$, 指尖梁数目 $n = 60$, 指尖密封型线控制点 p_1 的纵坐标 $y = 29.301 \text{ mm}$ 。在 p_1 的控制下, 优化后的指尖密封型线可以用参数方程表示为

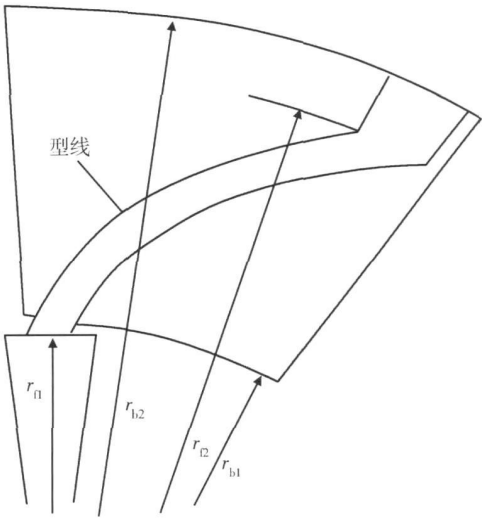
$$\begin{cases} x(t) = 2t(1-t) \cdot 11.25 + t^2 \cdot 22.5 \\ y(t) = (1-t)^2 \cdot 25 + 2t(1-t) \cdot 29.301 + t^2 \cdot 38.97 \end{cases}$$

(2)

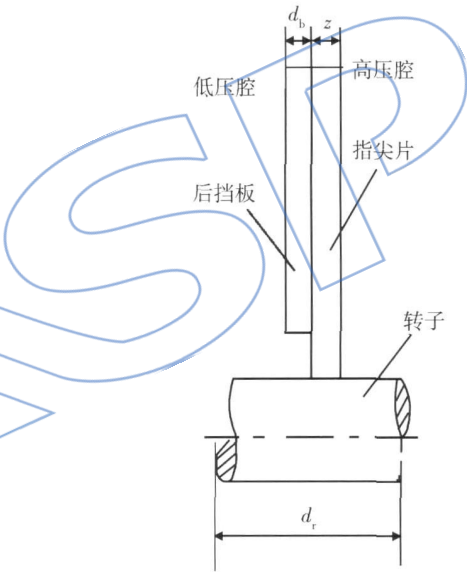
表 1 指尖密封结构参数

Table 1 Structural parameters of finger seal

后挡板结构参数/mm		指尖片结构参数/mm		
内圆半径 r_{b1}	外圆半径 r_{b2}	轴向厚度 d_b	基圆半径 r_{f1}	根圆半径 r_{f2}
26	50	0.5	25	45
转子轴向厚度 d_r /mm		0.45		



(a) 端面结构示意图



(b) 轴向结构示意图

图 1 指尖密封结构示意图
Fig. 1 Structure of finger seal

式中, 参数 t 的取值范围是 $[0, 1]$ 。通过公式 (2) 计算出若干个离散点坐标后即可拟合成光滑的指尖密封型线。

由公式 (2) 获得的指尖密封型线具有“上凹”的构形(如图 2 所示), 这与目前应用的对数螺线指尖密封型线和渐开线指尖密封型线不同, 后两

者的型线构形是“上凸”形式的. 这一“上凹”形指尖密封型线的提出, 极有可能形成新的高性能指尖密封结构.

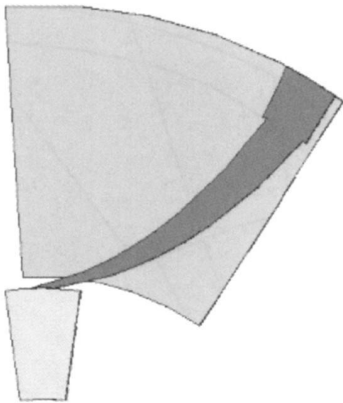


图 2 “上凹”型线指尖密封结构

Fig. 2 Structure of Upr concave finger seal

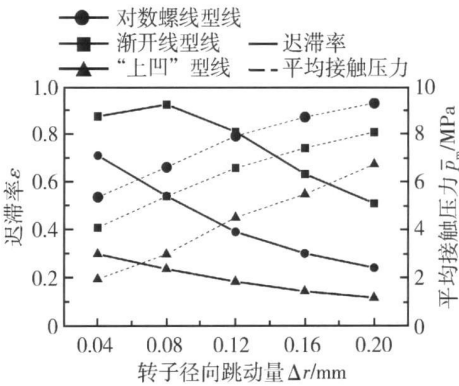
3 “上凹”构形型线指尖密封性能的分析讨论

在表 1 所示的结构参数条件下, 对目前应用较多的对数螺线型线指尖密封、渐开线型线指尖密封和“上凹”型线指尖密封进行了有限元性能分析, 希望通过不同型线构形指尖密封性能差异的比较, 以对“上凹”型线指尖密封有进一步的认识.

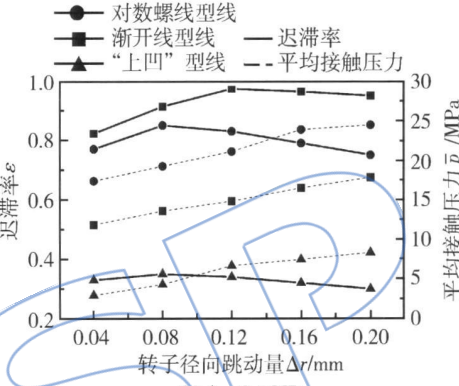
图 3 是密封装置上下游压差 Δp 分别为 0.1 MPa 和 0.5 MPa 时, 对数螺线型线指尖密封、渐开线型线指尖密封和“上凹”型线指尖密封的迟滞率 ε 及平均接触压力 $\bar{p}_m$ 随转子径向跳动量变化的情况. 显然, 三种不同型线指尖密封的迟滞率及指尖靴/转子接触区的平均接触压力随转子径向跳动量的变化趋势是一致的, 但在两种不同压差条件下, 涵盖整个转子径向跳动量范围, “上凹”型线指尖密封的迟滞率和平均接触压力都是最小的. 这表明至少 在本文涉及的结构和工况条件范围内, 可以提出“上凹”型线指尖密封具有更为优良的性能”的结论, “上凹”构形的指尖密封型线的出现对于高性能指尖密封研究工作来讲, 也不啻是一件令人兴奋的事情.

“上凹”型线指尖密封具有更为优良性能的原因可以通过下面的分析得到进一步的解释.

从图 1 可以看出, 在指尖密封装置中, 指尖曲梁跟随转子径向跳动而产生变形时, 变形区域分为两个不同区域: 指尖曲梁与后挡板接触的区域和指尖曲梁自由区域. 在前一个区域, 指尖曲梁的位移及变形的产生和恢复均受到因上下游压力差



(a) $\Delta p=0.1$ MPa



(b) $\Delta p=0.5$ MPa

图 3 迟滞率和平均接触压力与转子径向跳动量的关系

Fig. 3 Effect of radial replacement of shaft on hysteresis and average contact pressure

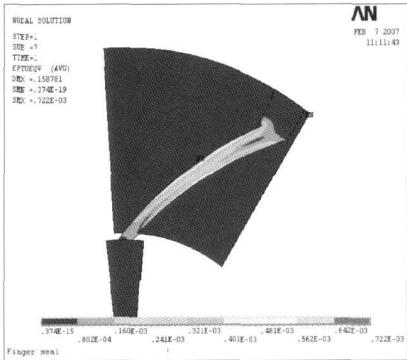
作用而在密封装置中产生的摩擦阻碍影响, 称之为阻尼变形区; 后一个区域, 指尖曲梁的位移及变形的产生和恢复则不受阻碍, 称之为自由变形区. 当转子产生径向跳动时, 随之形成的指尖曲梁位移及变形同时发生在自由变形区和阻尼变形区, 当转子恢复至初始位置时, 自由变形区的指尖曲梁位移及变形可以完全恢复和回弹, 而在阻尼变形区的变形则由于摩擦阻滞作用而部分残留, 从而产生迟滞.

图 4 和图 5 分别为在表 1 所示的结构参数条件和相同的工况条件下, 用有限元方法计算获得的三种型线指尖密封的应变云图和径向位移图.

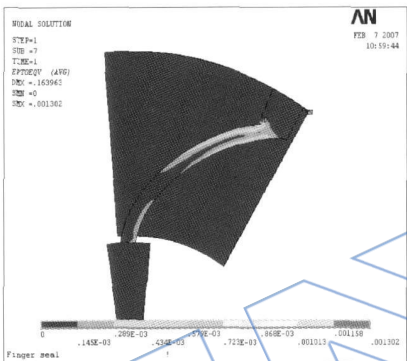
从图 4 中可以看出, 对数螺线型线指尖密封和渐开线型线指尖密封的变形主要发生在指尖曲梁的中部和根部, 即大部分变形发生在阻尼变形区. 而“上凹”型线指尖密封的变形主要发生在指尖曲梁的靴部, 即变形主要成分是不会形成迟滞的自由变形. 从指尖密封径向位移仿真分析(见图 5)的角度同样支持了上述看法.

因此可以认定, 当转子产生径向跳动与指尖曲梁发生碰撞, 促使指尖曲梁径向外移并产生变

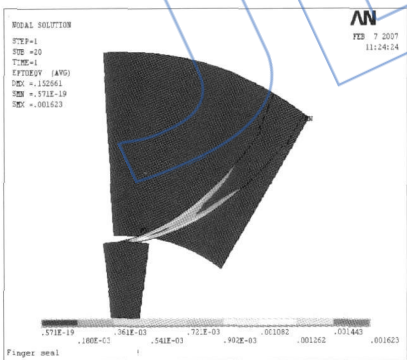
形时,“上凹”型指尖曲梁的位移及变形主要发生在自由变形区,当转子恢复至初始位置后,指尖曲梁的自由变形将全部恢复,形成迟滞效应的残余变形较少,表现出更好的低迟滞性能。



(a) 对数螺线型线指尖密封



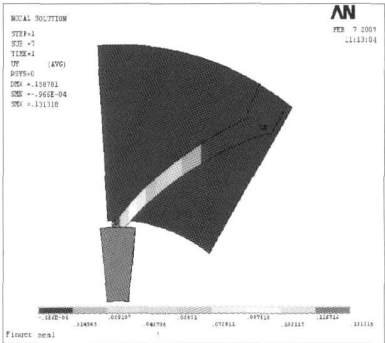
(b) 渐开线型线指尖密封



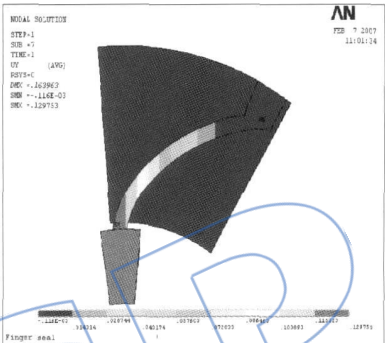
(c) “上凹”型线指尖密封

图 4 不同型线指尖密封的应变云图
Fig.4 Strain in finger seals with different curves

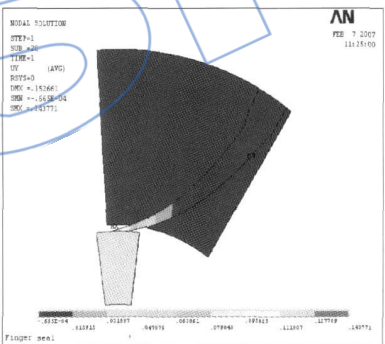
同样的道理,由于较少地受制于指尖密封装置中的摩擦迟滞作用,“上凹”型线指尖密封表现的更为“轻盈”,具有更好的随动性,因而指尖靴/转子接触区的平均接触压力也较小,表现出良好的接触性能.由于“上凹”型线指尖密封的迟滞性能和接触性能改善不以对方性能的恶化作为代价,是一种很有前途的指尖密封结构形式。



(a) 对数螺线型线指尖密封



(b) 渐开线型线指尖密封



(c) “上凹”型线指尖密封

图 5 不同型线指尖密封的径向(Y 方向) 位移图
Fig.5 Radial displacement (Y direction) in finger seals with different curves

4 结 论

- (1) 构建了指尖密封性能多目标优化的 Stackelberg 对策模型,采用基于 BP 神经网络的遗传算法实现了 Stackelberg 系统主从层面上的指尖密封性能的可控优化,获得了具有低迟滞低磨损性能的“上凹”构形指尖密封型线;
- (2) 在本文涉及的结构和工况条件范围内,“上凹”型线指尖密封较之对数螺线型线指尖密封和渐开线型线指尖密封,具有更为优良的迟滞和接触性能;
- (3) 同等结构条件和工况条件下的有限元分析合理地解释了“上凹”型线指尖密封具有较好性

能的原因,表明“上凹”型线指尖密封具有良好的应用前景.

参考文献:

[1] Arora G K, Margaret P P, Steinetz B M, et al. Pressure balanced low hysteresis finger seal test results[R]. Los Angeles, USA: The 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999.

[2] SU Hua, CHEN Guoding. APDL based structural optimization and sensitivity analysis for low hysteresis finger seal [C] // In: Proceedings of the 6th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing. Xi' an, China: [s. n.] June 21-23, 2004.

[3] Arora G K, Glick D I. Pressure balanced finger seal U. S. Patent 6196550: [P]. 2001.

[4] Braun M J, Pierson H M, Deng D. Thermofluids considerations and the dynamic behavior of a finger seal assembly

[J]. Tribology Transactions, 2005, 48: 531-540.

[5] 苏华, 陈国定. 低迟滞渐开线型指尖密封的结构参数优化 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23 (9): 1120-1122.

SU Hua, CHEN Guoding. Structural optimization of involute shape curve finger seal with low hysteresis [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23 (9): 1120-1122.

[6] 陈国定, 苏华, 张永红. 指尖密封轴向布局的变尺度结构研究 [J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 488-491.

CHEN Guoding, SU Hua, ZHANG Yonghong. Variable dimension construction in the axial arrangement of finger seal mechanism [J]. Journal of Aerospace Power 2003, 18 (4): 488-491.

[7] 盛昭瀚. 主从递阶决策论-Stackelberg 问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[8] Lorian P, Morgan J. A theoretical approximation scheme for stackelberg games [J]. Optimization Theory and Applications, 1989, 61(1): 95-110.

