

专题——表面织构制备、性能及作用机理

# 织构化机械密封的润滑与泄漏特性 协调优化研究进展

王秀英, 李思远, 戴庆文, 黄巍, 王晓雷

(南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室, 南京 210016)

**摘 要:** 针对机械密封的润滑和泄漏特性, 研究发现, 同时改善两特性的表面织构往往伴有较复杂的设计准则, 而形式相对简单的织构设计在改善润滑性能的同时, 往往导致泄漏增加。对互相矛盾的多个性能指标进行协调优化是表面织构技术在机械密封领域面临的挑战。优化算法是一种客观获得问题最优解的有效手段。鉴于此, 介绍了基于单目标优化算法的表面织构形状优化研究现状, 总结了基于多目标优化算法的机械密封润滑特性和泄漏特性协调优化研究的主要进展, 并聚焦于同时以承载力和泄漏率为指标的螺旋槽参数和自由织构形状优化, 最后分析了协调优化研究中存在的不足, 并展望了其发展方向, 以期进一步推进表面织构技术在密封领域的应用。

**关键词:** 机械密封; 表面织构; 润滑; 泄漏; 协调优化

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0001-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.001

## Research Progress in Coordinated Optimization of Lubrication and Leakage for Textured Mechanical Seals

WANG Xiu-ying, LI Si-yuan, DAI Qing-wen, HUANG Wei, WANG Xiao-lei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**ABSTRACT:** In view of the lubrication and leakage characteristics of mechanical seals, it has been found that the texture designed for improving the lubrication and leakage properties always has complex design guidelines, and the texture with simple forms always leads to leakage increase while improving the lubrication property. Coordinated optimization of conflicting performances is a challenge of surface texture in mechanical seals. Optimization algorithm is an effective method to obtain the optimal solution objectively. The research progress of texture shape optimization based on single-objective optimization algorithm was introduced. The progress of coordinated optimization of lubrication and leakage characteristics for mechanical seals based on multi-objective optimization algorithm was analyzed and the optimizations of spiral groove parameters and free-form texture shape based on the objectives in term of load-carrying capacity and leakage rate were emphasized. Finally, the shortcomings of coordinated optimization research are pointed out and the development direction is prospected to further

收稿日期: 2018-10-26; 修订日期: 2018-11-29

Received: 2018-10-26; Revised: 2018-11-29

基金项目: 国家自然科学基金 (51675268); 江苏省研究生培养创新工程 (KYLX16\_0326)

Fund: Supported by the National Nature Science Foundation of China (51675268) and the Funding of Jiangsu Innovation Program for Graduate Education (KYLX16\_0326)

作者简介: 王秀英 (1989—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为密封端面织构设计。

Biography: WANG Xiu-ying (1989—), Female, Ph. D. student, Research focus: texture designing for mechanical seals

通讯作者: 王晓雷 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。邮箱: wxl@nuaa.edu.cn

Corresponding author: WANG Xiao-lei (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: wxl@nuaa.edu.cn

improve the application of surface texture in mechanical seals.

**KEY WORDS:** mechanical seals; surface texturing; lubrication; leakage; coordinated optimization

针对机械设备中的旋转轴密封问题,机械密封于1885年以专利的形式在英国出现,迄今已有超过100年的应用历史。其基本结构如图1所示<sup>[1]</sup>,由至少一对垂直于旋转轴的端面在相对滑动中保持贴合,实现流体介质的密封。然而,目前密封失效仍是造成流体机械设备维修的主要原因。在日常机、泵、釜等设备的维修工作中,机械密封的维修工作量占了约50%。如日本某厂的786件事件中,有332件是密封失效造成的,占总数的42%<sup>[2]</sup>。此外,随着机械设备向大型化、高效以及高可靠性的快速发展,机械密封的使用环境也正逐步向高参数化发展,要求能够在高速、高压、高温及复杂介质等严苛的工况条件下保持可靠的工作状态。如图2所示<sup>[3]</sup>,从20世纪70年代至今,机械密封的最高工作温度从600 K上升至800 K,最高工作压力从6 MPa上升至20 MPa,介质黏度、工作速度和密封件尺寸等也均有明显增长。越来越严苛的工况条件对机械密封行业的创新研究和技术改进提出了迫切要求。

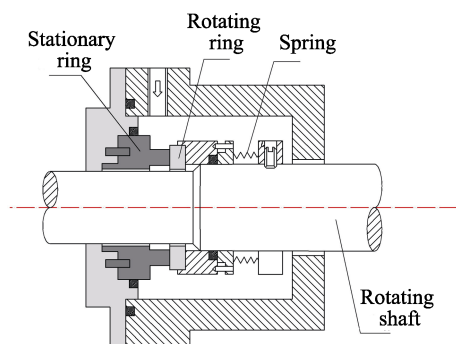


图1 机械密封基本结构

Fig.1 Basic structure of mechanical seal

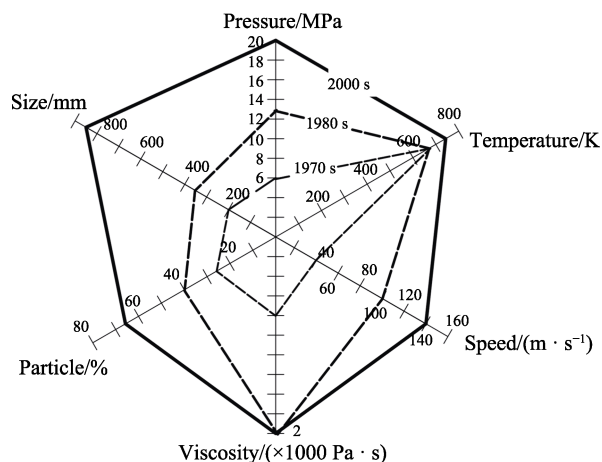


图2 机械密封工况条件的发展

Fig.2 Development of working conditions of mechanical seal

高参数机械密封的设计中,在密封端面设计以流体动压/静压槽为代表的微结构,极大地改进了机械

密封的性能。John Crane公司于1968年研制出圆弧面螺旋槽非接触式机械密封,并获美国专利,后又相继研制出多种平面螺旋槽端面密封,并成功应用于涡轮膨胀机和循环氢压缩机等设备<sup>[2]</sup>。图3为John Crane公司设计的T28型干气密封。GE公司将具有流体动压槽的端面密封应用在CF6-80C2发动机的4、5号轴承腔,使密封件的承受温度达到510℃,线速度达到137 m/s。与篦齿密封相比,泄漏率降低约96%<sup>[4]</sup>。顾永泉等人于20世纪90年代设计了泵入式圆弧槽气体端面密封<sup>[2]</sup>,王玉明等人设计了八字形螺旋槽端面密封<sup>[5]</sup>,推动了非接触式机械密封的发展。

表面织构(surface texture)的概念雏形(microirregularity)于1966年被HAMILTON首次提出<sup>[6]</sup>,是指为了获得特定功能,在零件工作界面人为地设计和加具有特定尺寸和排布规律的几何结构阵列<sup>[3,7]</sup>。由于表面织构具有改善润滑特性的效果,20世纪90年代,在ETSION教授的推动下,成为摩擦学领域的研究热点。机械密封端面典型的圆形凹坑织构阵列如图4所示<sup>[8]</sup>。由于流体动压/静压槽的出现早于表面织构,以致后来很少有学者将其归类为表面织构,但从表面织构的定义来看,它们也应属于同一范畴。从几何的角度来看,凹槽和凹坑没有本质区别,特别是常见的椭圆形凹坑与凹槽的相似度就更高了。

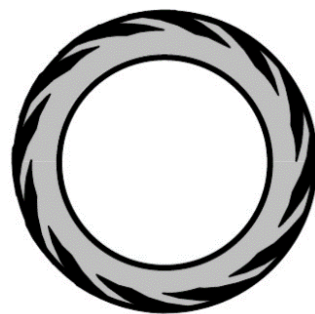


图3 T28型干气密封

Fig.3 T28 dry gas seal

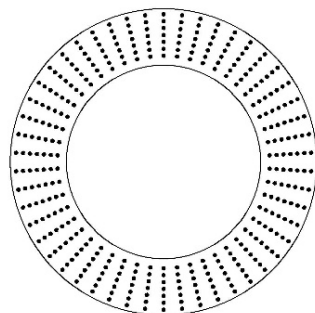


图4 织构化密封端面

Fig.4 Textured mechanical seal

## 1 表面织构对润滑特性和泄漏特性的影响机理

表面织构在改善润滑特性方面的主要作用机理可概括为以下几点<sup>[3,9-14]</sup>:

1) 高速轻载条件下, 产生附加流体动压效应, 提高流体膜的承载力。摩擦副运动过程中, 凹坑附近存在一个收敛楔和一个发散楔, 介质在收敛楔处产生流体动压效应, 在发散楔处存在“气穴”现象, 抑制负压的产生, 进而形成局部流体动压力<sup>[13]</sup>。

2) 在干摩擦或贫油润滑条件下, 表面织构可有效捕捉和容纳颗粒杂质及磨屑, 以减缓磨粒磨损的程度。

3) 在低速重载条件下, 表面织构可以存储润滑油, 实现“二次润滑”, 改善摩擦副的润滑状态。

此外, 表面织构还可以有效改善温度分布, 有利于热量散发<sup>[15-18]</sup>, 并具有抑制摩擦尖叫噪声的作用<sup>[21-22]</sup>。在软硬材料配对的摩擦副中, 织构边缘应力集中现象显著<sup>[21]</sup>, 大尺寸的织构往往会对软材料产生切削作用, 织构形式的多样化及设计尺度的减小可有效削弱特定条件下的切削现象<sup>[22]</sup>。

对机械密封而言, 除润滑特性外, 泄漏特性也是一个重要的性能参数。SUN 等<sup>[23]</sup>指出, 织构化机械密封开启力的提高会导致密封间隙增大, 从而引起泄漏率增大。也有学者研究发现, 具有提高流体膜承载力的织构往往具有较高的泄漏率, 而泄漏率较低的织构也通常无法提供较高的承载能力<sup>[24-25]</sup>。具有特定方向的高压侧织构(如位于高压侧的倾斜螺旋槽)具有泵送介质至密封间隙来改善润滑的能力, 却也因为泵送作用增大了泄漏率, 而为了控制泄漏弱化其泵送能力时, 密封间隙则没有足够的润滑介质, 往往也无法获得理想的润滑特性。以上分析表明, 织构化机械密封的润滑特性和泄漏特性不容易同时达到理想状态<sup>[23-27]</sup>, 改善其中一个性能的同时, 很可能使另一个性能变差。鉴于此, 机械密封端面的表面织构设计需要协调其润滑特性和泄漏特性, 以获得较优的综合效果。

织构化机械密封端面间隙中的流体主要包含由内外压差形成的压差流和由表面织构产生的剪切流。利用剪切流补偿压差流可有效降低或完全阻止泄漏。基于此理论, ETSION<sup>[28]</sup>于 1984 年提出零泄漏机械密封的概念, 并设计了圆叶槽机械密封, 其合作者 LIPSCHITZ 利用同样的原理提出零泄漏可控浮动膜机械密封<sup>[29]</sup>。具有特定方向的低压侧织构(如上游泵送密封)具有将泄漏的部分介质泵送回密封腔的能力, 某种程度上阻挠了高压侧至低压侧的泄漏<sup>[30]</sup>。也就是说, 通过分布位置和倾斜方向的设计可使表面织构具有不同的泵送方向, 实现对动压效果和泄漏特性的控制。鉴于此, 研究者们设计了各种组合织构<sup>[31-38]</sup>, 如双侧倾斜凹坑阵列<sup>[38]</sup>、人字槽<sup>[33-34]</sup>、双螺旋槽<sup>[35,37]</sup>、

槽堰组合螺旋槽<sup>[39]</sup>及自润滑双排流槽<sup>[36]</sup>等。组合织构的样例如图 5 所示。组合织构的设计需要综合考虑不同工况条件下表面织构的泵送效果、流体动压效果及压差之间的关系, 初步的主观设计依赖于丰富的经验数据, 之后需要开展精密的计算, 修改织构参数, 以保证压差流和剪切流的平衡关系。这使组合织构的设计工作变得复杂, 往往需要繁琐的设计准则进行指导。

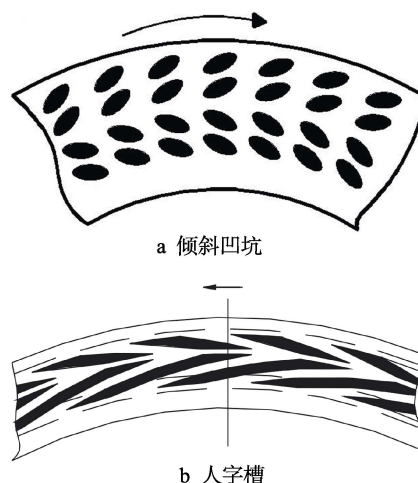


图 5 双侧织构

Fig.5 Surface textures on two sides:  
a) Inclined pit; b) Herringbone groove

## 2 基于优化算法的自由织构形状优化

关于表面织构的几何参数、形状和排布形式等对机械密封性能的影响, 文献[40]进行了详细的总结和分析。然而, 目前的参数优化研究中, 织构形状大多还局限于规则的几何结构, 如三角形<sup>[41]</sup>、圆形<sup>[8, 42-52]</sup>及椭圆形<sup>[53-55]</sup>等。表面织构技术源于仿生学, 自然界的生存法则使动物体表进化出各种复杂的结构, 以适应生存环境。生物体表结构的多样性意味着织构类型不应局限于规则形状, 考虑形状的多样性成为新的研究方向。

此外, 织构参数优化研究多是基于经验数据主动设计, 在数量有限的样本数据下, 采用数值或试验的方法获得各参数的影响规律。也有学者采用正交试验的方法在有限的试验次数下获得更多信息<sup>[56-57]</sup>。这些研究方法往往只能获得有限样本数据中的局部最优解, 不容易客观地获得全局最优织构参数。

优化算法已经成功应用于各种工程优化工作中, 是客观获得优化织构形式的有效手段。织构形状的优化取决于高自由度形状模型的建立, 完全自由的形状将大大提高算法的时间复杂度和空间复杂度。SHEN 等<sup>[58-59]</sup>在织构区域均匀设计了平行线段, 以水平线段的位置和长度为变量, 构成形状相对自由的凹坑, 然后以承载力为目标, 采用 SQP 算法对织构形状进行优化。该算法通过求解迭代点处的二次规划问题, 获



得下次迭代的搜索方向,具有全局收敛性和局部超线性收敛的优点,被认为是求解非线性约束优化问题的最有效方法之一。研究发现,单向运动时,如图 6a 所示的 Chevron-shape 凹坑可获得较高的承载力。对面积率为 20% 的 Chevron-shape 凹坑与圆凹坑、椭圆凹坑等规则形状的组织进行对比试验,发现 Chevron-shape 凹坑在不同工况条件下均具有较低的摩擦系数,证实了优化算法的可靠性。ZHANG 等<sup>[60-61]</sup>采用由中心向四周发射不同长度半径的形式建立了形状

相对自由的组织模型,并添加了水平和垂直方向的对称约束,以摩擦系数为优化目标,采用遗传算法(GA)进行组织形状优化,获得了往复运动下的优化组织形状,如图 6b、c 所示<sup>[60]</sup>。然后释放一个对称约束,建立了更高自由度的组织模型,获得了单向运动下的优化组织形状,如图 6d、e 所示<sup>[61]</sup>。GA 被认为是处理高维、非线性和离散问题的有效方法,获得的解决方案可能并不是最好的,却可以产生一个或几个相对可靠的解决方案<sup>[60]</sup>。

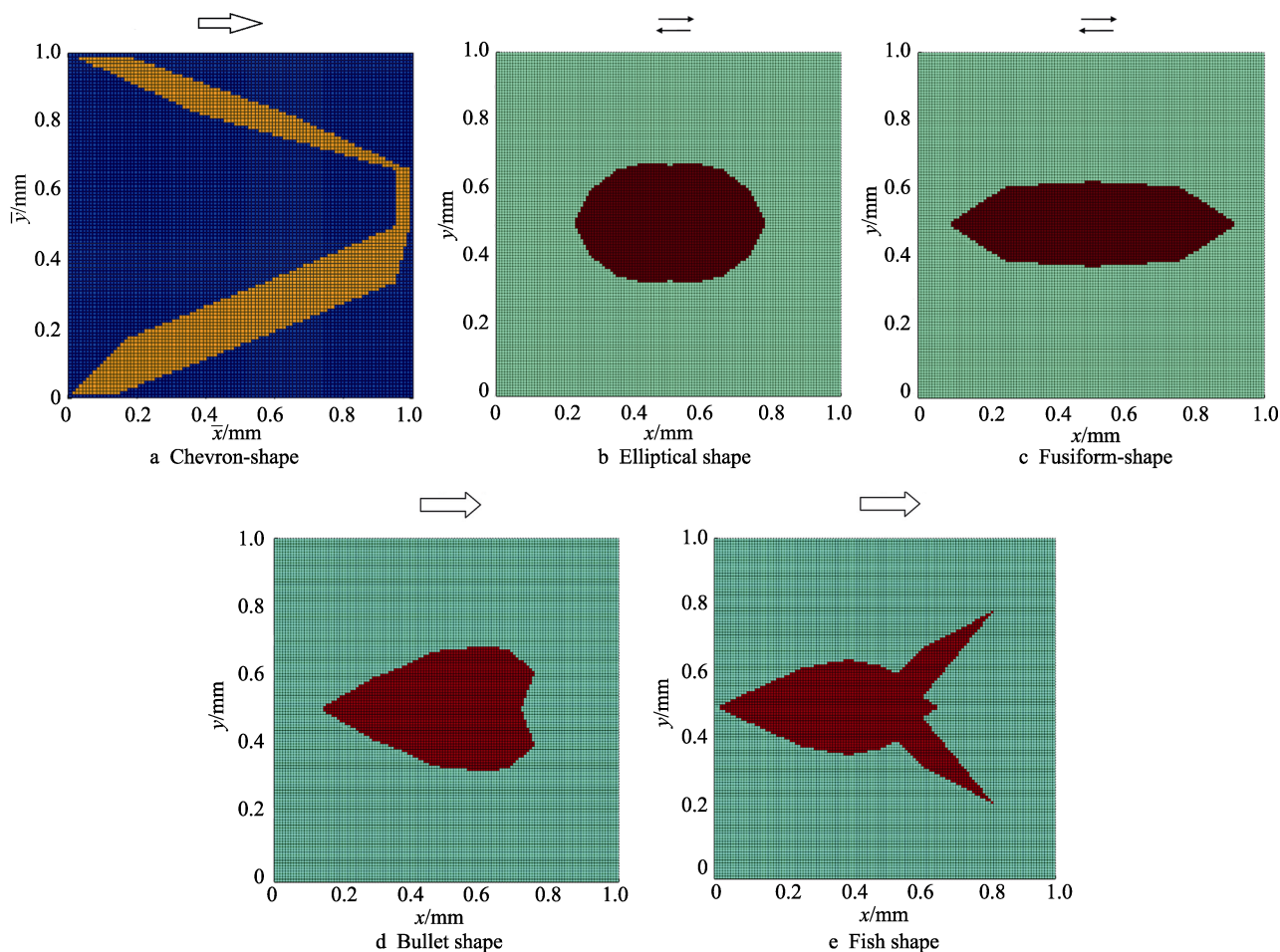


图6 表面组织的优化形状  
Fig.6 Optimal shapes of surface texture

与人为主观设计的组织形状相比,基于优化算法得到的优化形状更加精准。优化形状,如 Chevron-shape、Fusiform shape、Fish shape 等,与规则的几何结构有明显差异,研究者依靠主观设计难以得到如此不规则的复杂形状,采用智能优化算法可能是唯一的途径。这些工作为客观地优化组织参数提供了可行的解决方法。

### 3 组织化机械密封性能间的协调优化

对于具有多个矛盾性能参数的工程优化问题,单一性能优化往往无法获得较优的综合性能,一个性能的极大改善是否会对另一个性能产生负面影响是工

程研究中必须考虑的事情。尤其当优化过程基于特定的某一个性能最优时,则完全忽略了对其他性能的考虑,放弃了多个性能间的折中选择。基于互相矛盾的多个目标,客观地获取其最优解一直都是学术界和工程界关注的焦点问题,机械密封端面的组织设计也面临着同样的挑战。

LIU 等<sup>[62]</sup>在设计双螺旋槽时,同时考虑了机械密封的流体膜刚度和泄漏,在泄漏最小的情况下,优化螺旋槽,获得最大的流体膜刚度。丁雪兴等<sup>[63]</sup>针对上游泵送密封建立了液膜开启力和泄漏量之比的协调函数,以协调函数为性能指标,对人字槽和单列槽进行对比,获得了较优的槽形参数。江锦波等<sup>[39]</sup>在槽堰组合螺旋槽的优化中,采用刚漏比(刚度和泄漏量的



比值)作为一个性能参数。这些研究已经开始综合考虑机械密封的润滑特性和泄漏特性,比分别对两个性能单独进行研究的织构优化工作有了转折性的进步,已经初步体现了多目标优化的思想,然而研究中采用的处理手段本质上仍是单目标优化。

传统的多目标优化求解算法有加权法、主要目标法和分层序列法等,大多都基于化繁为简的原则,且掺杂了较多主观偏好,不易获得客观优化解。1989年 GOLDBERG 提出的非支配排序和小生境技术是多目标智能优化算法的萌芽<sup>[64]</sup>,随后出现了许多成熟的多目标优化算法,第一代主要有 MOGA、NSGA 和 NPGA 等,第二代主要有 SPEA/SPEA-2 和 NSGA-II 等。NSGA 的优点是最优解分布均匀,优化目标的个数随意,主要缺点是计算复杂度高,缺少精英策略,且受到共享参数的限制。NSGA-II 是 2002 年 DEB 等对 NSGA 的改进<sup>[65]</sup>,是迄今较优秀的多目标优化算法。这些优化算法作为一类启发式搜索算法,已被成功应用于多目标优化问题,多目标优化算法致力于寻找满足约束条件的一组决策变量及 Pareto 最优解。Pareto

最优解包含了广泛的目标函数取值,解之间不存在优劣关系,在其对应的情况下都是最优的。

受启发于上述利用 SQP 和 GA 进行的织构形状优化工作,将多目标优化算法应用于织构化机械密封的润滑特性和泄漏特性的协调优化中,可更客观地获得理想的综合性能。WANG 等<sup>[27]</sup>首次采用带有精英策略的 NSGA-II 算法对密封端面的织构进行多目标优化,初步工作基于尺寸参数可变的螺旋槽展开,以无量纲泄漏率  $\bar{Q}$  和无量纲承载力  $\bar{W}$  为目标,获得了一组优化螺旋槽结构,如图 7 所示。从左至右,优化螺旋槽的性能参数  $\bar{Q}$  和  $\bar{W}$  取值越来越高,可为不同的工况条件提供参考,决策者可结合实际需求(如泄漏量要求)或个人偏好进行选择。以第五个优化结构为例,其  $\bar{Q}=107$ ,  $\bar{W}=7.9$ ,在所研究的螺旋槽参数范围内,具有相同泄漏率的其他螺旋槽不可能获得高于 7.9 的无量纲承载力,同样地,具有相同承载力的其他螺旋槽也无法将无量纲泄漏率降低到 107。即优化螺旋槽在其对应的泄漏率下具有最高的承载力,反之亦然。

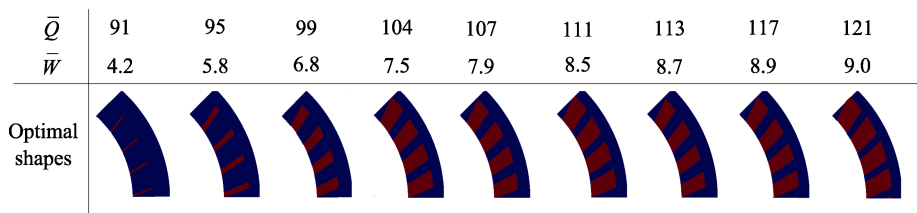


图 7 优化螺旋槽及对应的优化解  
Fig.7 Optimal spiral grooves and the optimal solutions

考虑到形状的多样性, WANG 等<sup>[66]</sup>随后建立了如图 8 所示的自由织构模型,将与 12 ( $n=6$ ) 个控制点位置相关的参数作为变量,利用 NSGA-II 算法得到

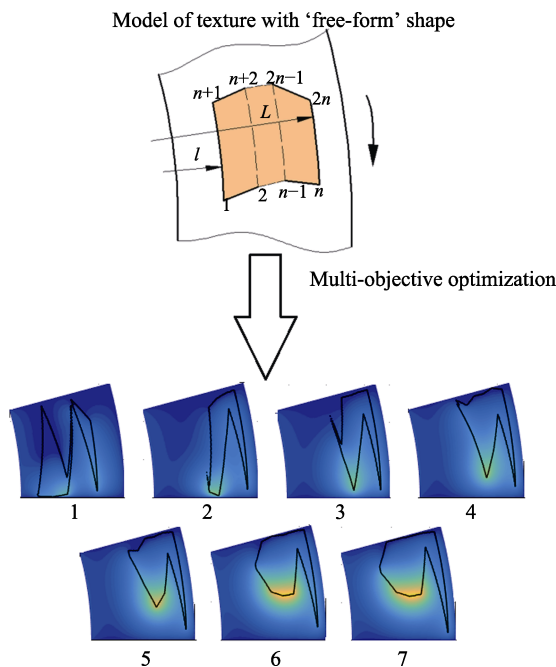


图 8 多目标优化凹坑  
Fig.8 Optimal dimple based on multi-objective optimization

一组非对称“V”形结构,其对应的 7 个优化解( $\bar{Q}, \bar{W}$ )如图 9 所示。图 9 中的散点为优化形状对应的解,阴影部分为模型中除优化形状外的其他形状对应的解。在相同的泄漏率下,优化形状具有最高的承载力,反之亦然。此外,对圆形、三角形、椭圆及方形四种规则织构,根据形状特点设置相应的变量(如圆形的变量为圆心 and 半径),采用同样的方法获得每种形状下的最优参数。将非对称“V”形结构与优化的规则形状对比发现,在相同的泄漏率下,非对称“V”形结构最高可提高承载能力 23.5%左右,证实了优化自由织构的优异性。

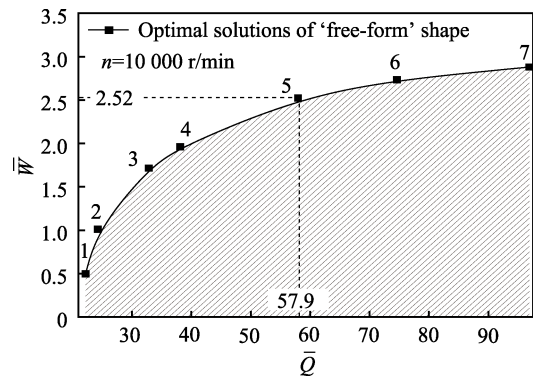


图 9 多目标优化解  
Fig.9 Solution of multi-objective optimization

这一工作基于互相矛盾的性能参数,较客观地优化织构形状,为织构化机械密封综合性能的改善提供了新的解决方法。另外,现有的织构加工技术基本不受形状限制,如激光加工技术可编程控制加工轨迹,光刻电解加工中决定织构形状的掩模版可设计任意复杂图案。针对常见的密封材料——碳化硅、石墨等绝缘性材料, SU 等人<sup>[67]</sup>提出的微磨料多相射流技术表现出较好的加工效果,为密封端面复杂织构形状的精密加工提供了可能。

机械密封端面的多目标协调优化研究还处于初步阶段,现有研究仍存在很多问题。如建立的自由织构模型仍具有较强的约束;除形状之外的其他织构参数也被设置为常数;因形状控制参数较多,使多目标优化过程耗时较长;为提高效率,对控制方程及物理模型进行了大量简化,在计算过程中没有考虑介质状态、温度等因素的影响。事实上,机械密封多性能间的协调优化研究是一个复杂、系统、全面的优化设计工作,后续研究需充分考虑工况条件、密封材料、密封介质等因素的影响。

如今,对性能参数的求解已非常成熟,如针对高速高温工况,有考虑温度影响和紊流状态影响的成熟理论模型;对复杂介质,有基于气液两相的理论控制模型。针对具体的工况条件,多目标优化算法可与对应的复杂理论模型相结合,求得更精确的优化解。另外,有必要开展相应的试验研究以验证理论优化结果的正确性,推进机械密封多性能间协调优化研究的实际应用。最后,不局限于机械密封,多目标优化也可以成为表面织构技术应用在其他具有多个性能指标的机械部件上研究新的手段。至此,侧重改善摩擦性能的表面织构技术研究可充分考虑特定研究对象的其他重要性能指标,进而更有针对性地进行织构优化工作,推动表面织构技术的应用型研究。

## 4 结语

改善机械密封润滑特性的表面织构设计往往导致泄漏特性变差,而致力于同时改善两特性的表面织构往往伴有较复杂的设计准则。单目标优化算法可针对某一性能,更大程度上发挥表面织构技术的优势,多目标优化算法为织构化机械密封润滑特性和泄漏特性的协调优化提供了可能。目前的协调优化研究还处于初步阶段,求解过程也进行了大量简化,后续研究可结合成熟的理论模型,充分考虑工况条件、介质状态等因素,进而获得更精确的优化织构形式。另外,还需要开展相应的试验研究验证优化成果,推进多目标优化成果在织构化机械密封上的实际应用。

## 参考文献:

[1] 郝木明. 过程装备密封技术[M]. 北京: 中国石化出版

社, 2010.

HAO Mu-ming. Sealing Technology of Process Equipment[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.

[2] 田伯勤. 新编机械密封实用技术手册[M]. 北京: 中国知识出版社, 2005.

TIAN Bo-qin. Newly organized manual of practical technical for mechanical seal[M]. Beijing: China Affairs Press, 2005.

[3] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 84-95.

WANG Jing-qiu, WANG Xiao-lei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of mechanical engineering, 2015, 51(23): 84-95.

[4] 林基恕, 张振波. 21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 108-114.

LIN Ji-shu, ZHANG Zhen-bo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21st century[J]. Journal of aerospace power, 2001, 16(2): 108-114.

[5] 王玉明, 吕岩, 王强, 等. 一种八字形螺旋槽端面密封装置: 中国, CN1045851A[P]. 1990-10-03.

WANG Yu-ming, LV Yan, WANG Qiang, et al. A face sealing device with "eight" shaped spiral grooves: China, CN1045851A[P]. 1990-10-03.

[6] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A theory of lubrication by microirregularities[J]. Journal of basic engineering, 1966, 88(1): 177-185.

[7] EVANS C J, BRYAN J B. "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 1999, 48(2): 541-556.

[8] QIU Y, KHONSARI M M. Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings[J]. Tribology international, 2011, 44(5): 635-644.

[9] YU Hai-wu, HUANG Wei, WANG Xiao-lei. Dimple patterns design for different circumstances[J]. Lubrication science, 2013, 25(2): 67-78.

[10] 于海武. 基于流体动压润滑效应的表面织构优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

YU Hai-wu. Optimal design of surface texture based on hydrodynamic lubrication[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[11] FOWELL M, OLVER A V, GOSMAN A D, et al. Entrainment and inlet suction: Two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings[J]. Journal of tribology, 2007, 129(2): 151-159.

[12] TØNDER K. Hydrodynamic effects of tailored inlet roughnesses: Extended theory[J]. Tribology international, 2004, 37(2): 137-142.

[13] NAKANO Miki, KORENAGA Atsuko, KORENAGA Atsushi, et al. Applying micro-texture to cast iron surfaces to reduce the friction coefficient under lubricated conditions[J]. Tribology letters, 2007, 28(2): 131-137.

[14] 万轶, 李建亮, 熊党生. 活塞环表面织构化镀层的摩擦性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 195-201.

WAN Yi, LI Jian-liang, XIONG Dang-sheng. Tribological property of textured-coating on piston ring surface[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 195-201.

[15] SILVA W M D, SUAREZ M P, MACHADO A R, et al. Effect of laser surface modification on the micro-abrasive wear resistance of coated cemented carbide tools[J]. Wear,

- 2013, 302(1-2): 1230-1240.
- [16] 孙华亮, 涂杰松, 商宏飞, 等. 织构对涂层刀具切削性能影响的有限元分析及实验研究[J]. 现代制造工程, 2013(9): 1-6.  
SUN Hua-liang, TU Jie-song, SHANG Hong-fei, et al. Study on the effect of texture on cutting performance of the coated tool with finite element analysis and experimental method[J]. Modern manufacturing engineering, 2013(9): 1-6.
- [17] 榎本俊之, 蒋修治. 具有微细表面形状的 DLC 涂层切削刀具的开发[J]. 超硬材料工程, 2008, 20(3): 49-54.  
ENOMOTO Toshiyuki, JIANG Xiu-zhi. Development of DLC coated cutting tool with micro surface shape[J]. Superhard material engineering, 2008, 20(3): 49-54.
- [18] 郝秀清, 宋晓路, 李亮. 表面织构化刀具的研究现状与进展[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 170-181.  
HAO Xiu-qing, SONG Xiao-lu, LI Liang. Development and perspective of surface texturing tools[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 170-181.
- [19] 盖小红, 莫继良, 刘铭倩, 等. 织构化表面处理抑制界面摩擦尖叫噪声[J]. 中国表面工程, 2015, 28(3): 102-107.  
GE Xiao-hong, MO Ji-liang, LIU Ming-qian, et al. Suppressing friction-induced squeal noise at interface by surface texturing[J]. China surface engineering, 2015, 28(3): 102-107.
- [20] 王东伟, 莫继良, 王正国, 等. 沟槽织构化表面影响摩擦振动噪声机理[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 112-116.  
WANG Dong-wei, MO Ji-liang, WANG Zheng-guo, et al. Mechanism of the effect of groove-textured surface on the friction vibration and noise[J]. Journal of mechanical Engineering, 2013, 49(23): 112-116.
- [21] WANG Xiao-lei, WANG Jing-qiu, ZHANG Bo, et al. Design principles for the area density of dimple patterns[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part J: Journal of engineering tribology, 2015, 229(4): 538-546.
- [22] 赵帅, 王晓雷. 高分子材料机械密封磨损特性及表面织构的影响[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(6): 761-767.  
ZHAO Shuai, WANG Xiao-lei. The effects of surface texture on the wear properties of mechanical seals made of metal and polymers[J]. Tribology, 2015, 35(6): 761-767.
- [23] SUN Jian-jun, MA Chen-bo, YU Qiu-ping, et al. Numerical analysis on a new pump-out hydrodynamic mechanical seal[J]. Tribology international, 2017, 106: 62-70.
- [24] NICOLE Z. Parametric study of spiral groove gas face seals[J]. Tribology transactions, 2000, 43(2): 337-343.
- [25] BAI Shao-xian, PENG Xu-dong, LI Ye-feng, et al. A hydrodynamic laser surface-textured gas mechanical face seal[J]. Tribology letters, 2010, 38(2): 187-194.
- [26] MILLER B A, WOODRUFF G W. Numerical formulation for the dynamic analysis of spiral-grooved gas face seals[J]. Journal of tribology, 2001, 123(2): 395-403.
- [27] WANG Xiu-ying, SHI Li-ping, HUANG Wei, et al. A multi-objective optimization approach on the spiral grooves for gas mechanical seals[J]. Journal of tribology, 2018, 140(4): 041701.
- [28] ETSION I. A new concept of zero-leakage noncontacting mechanical face seal[J]. Journal of tribology, 1984, 106(3): 338-343.
- [29] LIPSCHITZ A. A zero-leakage film riding face seal[J]. Journal of tribology, 1985, 107(3): 326-330.
- [30] 郝木明. 机械密封技术及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010.  
HAO Mu-ming. Mechanical seal technology and application[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010.
- [31] 彭旭东, 呼延晨龙, 白少先, 等. 仿生多叶翼型槽干式气体端面密封的性能研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 372-381.  
PENG Xu-dong, HUYAN Chen-long, BAI Shao-xian, et al. Performance research on a bionic multi wing-like spiral grooved dry gas face seal[J]. Tribology, 2013, 33(4): 372-381.
- [32] 王伟, 陶丹萍, 涂桥安, 等. 组合螺旋型槽干气密封的设计及结构优化[J]. 润滑与密封, 2015, 40(8): 51-55.  
WANG Wei, TAO Dan-ping, TU Qiao-an, et al. Design and structural optimization of combined spiral groove dry gas seals[J]. Lubrication engineering, 2015, 40(8): 51-55.
- [33] WANG Yu-ming, YANG Hui-xia, WANG Jian-li, et al. Theoretical analyses and field applications of gas-film lubricated mechanical face seals with herringbone spiral grooves[J]. Tribology transactions, 2009, 52(6): 800-806.
- [34] LAI T W. Development of non-contacting, non-leaking spiral groove liquid face seals[J]. Lubrication engineering, 1994, 50(8): 625-631.
- [35] LAI T W. Face seal with double spiral grooves: United states, 5201531A[P]. 1993-4-13.
- [36] 郝木明, 胡丹梅, 葛京鹏, 等. 双列流体动压槽自润滑非接触式机械密封: 中国, CN 2442034Y[P]. 2001-08-08.  
HAO Mu-ming, HU Dan-mei, GE Jing-peng, et al. Double row fluid dynamic pressure groove self lubrication non-contact type mechanical seal: China, CN 2442034Y[P]. 2001-08-08.
- [37] 汤臣杭, 杨惠霞, 王玉明. 单向双列螺旋槽干气密封流场数值模拟[J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 145-148.  
TANG Chen-hang, YANG Hui-xia, WANG Yu-ming. Flow numerical simulation of dry gas seal with double row spiral grooves[J]. Lubrication engineering, 2007, 32(1): 145-148.
- [38] 白少先, 柏林清, 孟祥铠, 等. 倾斜微孔密封端面气体润滑动压效应实验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(6): 831-835.  
BAI Shao-xian, BAI Lin-qing, MENG Xiang-kai, et al. Experimental research on hydrodynamic effect of inclined micro-pored gas face seals[J]. China mechanical engineering, 2013, 24(6): 831-835.
- [39] 江锦波, 陈源, 徐奇超, 等. 干气密封螺旋槽衍生结构演变规律与工况适用性[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(3): 264-273.  
JIANG Jin-bo, CHEN Yuan, XU Qi-chao, et al. Evolution



- rule and working applicability of typical derived structures of spiral groove dry gas seal[J]. *Tribology*, 2018, 38(3): 264-273.
- [40] AHMED A, MASJUKI H H, VARMAN M, et al. An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals[J]. *Meccanica*, 2015, 51(1): 1-15.
- [41] XIE Yi, LI Yong-jian, WANG Yu-ming, et al. An experimental investigation of tribological performance of train-gular textures in water lubrication regime[J]. *Science China (Physics, mechanics & astronomy)*, 2014, 57(2): 273-279.
- [42] WANG Tao, HUANG Wei-fang, LIU Xiang-feng, et al. Experimental study of two-phase mechanical face seals with laser surface texturing[J]. *Tribology international*, 2014, 72: 90-97.
- [43] MCNICKLE A D, ETSION I. Near-contact laser surface textured dry gas seals[J]. *Journal of tribology*, 2004, 126(4): 788-794.
- [44] FELDMAN Y, KLIGERMAN Y, ETSION I. A hydrostatic laser surface textured gas seal[J]. *Tribology letters*, 2006, 22(1): 21-28.
- [45] WANG Xiao-lei, KATO K, ADACHI K, et al. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed[J]. *Tribology international*, 2001, 34(10): 703-711.
- [46] WANG Xiao-lei, KATO K, ADACHI K, et al. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water[J]. *Tribology international*, 2003, 36(3): 189-197.
- [47] ZHAN Jian, YANG Ming-jiang. Investigation on dimples distribution angle in laser texturing of cylinder-piston ring system[J]. *Tribology transactions*, 2012, 55(5): 693-697.
- [48] KLIGERMAN Y, ETSION I. Analysis of the hydrodynamic effects in a surface textured circumferential gas seal[J]. *ASLE transactions*, 2001, 44(3): 472-478.
- [49] HALPERIN I E G. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal[J]. *ASLE transactions*, 2002, 45(3): 430-434.
- [50] KLIGERMAN Y, SHINKARENKO A. The effect of tapered edges on lubrication regimes in surface-textured elastomer seals[J]. *Tribology international*, 2011, 44(12): 2059-2066.
- [51] SEGU D Z, KIM S S. Influence on friction behavior of micro-texturing under lubricated non-conformal contact[J]. *Meccanica*, 2014, 49(2): 483-492.
- [52] 张培耘, 华希俊, 符永宏, 等. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. *表面技术*, 2013, 42(5): 55-58.
- ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong. Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology and application[J]. *Surface technology*, 2013, 42(5): 55-58.
- [53] YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, ZHOU Fei. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces[J]. *Tribology letters*, 2010, 37(2): 123-130.
- [54] WANG Xiao-lei, ADACHI K, OTSUKA K, et al. Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water[J]. *Applied surface science*, 2006, 253(3): 1282-1286.
- [55] WANG Xiao-lei, KATO K. Improving the anti-seizure ability of sic seal in water with RIE texturing[J]. *Tribology letters*, 2003, 14(4): 275-280.
- [56] 严东升. 活塞环表面织构的摩擦学性能基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- YAN Dong-sheng. Fundamental research on tribological performance of textured piston ring[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [57] 戚宝运, 李亮, 何宁, 等. 微织构刀具正交切削 Ti6Al4V 的试验研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(4): 346-351.
- QI Bao-yun, LI Liang, HE Ning, et al. Experimental study on orthogonal cutting of Ti6Al4V with micro-textured tool[J]. *Tribology*, 2011, 31(4): 346-351.
- [58] SHEN Cong, KHONSARI M M. Texture shape optimization for seal-like parallel surfaces: theory and experiment[J]. *Tribology transactions*, 2016, 59(4): 698-706.
- [59] SHEN Cong, KHONSARI M M. Numerical optimization of texture shape for parallel surfaces under unidirectional and bidirectional sliding[J]. *Tribology international*, 2015, 82: 1-11.
- [60] ZHANG Hui, DONG Guang-neng, HUA Meng, et al. Improvement of tribological behaviors by optimizing concave texture shape under reciprocating sliding motion[J]. *Journal of tribology*, 2017, 139(1): 011701.
- [61] ZHANG Hui, HUA Meng, DONG Guo-zhong, et al. Optimization of texture shape based on genetic algorithm under unidirectional sliding[J]. *Tribology international*, 2017, 115: 222-232.
- [62] LIU Zhong, LIU Ying, Liu Xiang-feng. Optimization design of main parameters for double spiral grooves face seal [J]. *Science in China*, 2007, 50(4): 448-453.
- [63] 丁雪兴, 陆俊杰, 张伟政, 等. 上游泵送机械密封两种优化槽形及性能的对比如[J]. *兰州理工大学学报*, 2015, 41(6): 74-78.
- DING Xue-xing, LU Jun-jie, ZHANG Wei-zheng, et al. Comparison between two optimized groove configurations and their performance for upstream pumping mechanical seal[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2015, 41(6): 74-78.
- [64] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Boston: Addison-wesley longoman publishing co, 1989.
- [65] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [66] WANG Xiu-ying, SHI Li-ping, DAI Qing-wen, et al. Multi-objective optimization on dimple shapes for gas face seals[J]. *Tribology international*, 2018, 123: 216-223.
- [67] SU Xiao, SHI Li-ping, HUANG Wei, et al. A multi-phase micro-abrasive jet machining technique for the surface texturing of mechanical seals[J]. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2016, 86(5-8): 2047-2054.