

DOI: 10.3901/JME.2015.11.171

# 周向波度密封环预变形平面研磨加工中的变形分析\*

周平 戴恒震 金洙吉 王宇 康仁科 郭东明

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

**摘要:** 端面周向波度密封是一种非接触机械密封,它具有泄漏低、刚度大和寿命长等优点,在核主泵和透平机械等旋转机械密封中有很好的应用前景。周向波度密封环端面面形非常复杂,加工极为困难。提出一种周向波度密封环的预变形平面研磨加工方法,并对其中最为关键的预变形过程进行了分析。通过对预变形过程中密封环变形特性的有限元分析,揭示了预紧力和密封环端面变形的关系,通过周期性反向扭矩的作用获得了满足要求的表面预变形。通过预变形夹具的研制和平面研磨工艺研究,完成了周向波度密封环的加工,证明了预变形平面研磨加工方法加工周向波度密封环的可行性。

**关键词:** 周向波度密封环; 预变形; 平面研磨; 有限元分析

**中图分类号:** TG580

## Analysis of Deformation in the Manufacturing Process of Seal Ring with Wavy Face Using the Pre-deformation Plane Lapping Method

ZHOU Ping DAI Hengzhen JIN Zhuji WANG Yu KANG Renke GUO Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** Sealing ring with wavy face is a kind of non-contact mechanical seal, which has advantages in low leakage, high stiffness and long life. It has a good application prospect in mechanical seal structure of nuclear reactor coolant pump and turbo machine. However, the manufacture of sealing ring with wavy face is a very challenging job due to the complex curve face. A pre-deformation plane lapping method of sealing ring with wavy face is proposed here, and the pre-deformation, which is the most critical process, is analyzed. The relationship between the pre-deformation force and the end face deformation of sealing ring is revealed through finite element analysis. It is found that the required surface deformation can be obtained by applying periodic reverse torque. Through the development of pre-deformation fixture and the research of lapping technology of ring surface, sealing ring with wavy face is successfully manufactured. The possibility of the manufacturing of sealing ring with wavy face using the pre-deformation plane lapping method is verified theoretically and experimentally.

**Key words:** sealing ring with wavy face; pre-deformation; plane lapping; finite element analysis

## 0 前言

核主泵是核电站的核心设备之一,被喻为反应堆的心脏。在压水反应堆中,核主泵(又称为反应堆冷却剂泵)用于驱动冷却剂在一回路系统内循环流动,通过蒸发器将反应堆堆芯热能传递给二回路,实现核反应热能的输出。压水堆核主泵中的冷却介质压力达到 150 个大气压,温度高达 300 ℃,并且

具有放射性,因此,密封性能的好坏直接影响整个核电站的安全可靠运行<sup>[1]</sup>。

核主泵轴封系统是防止泵内冷却剂泄漏的关键机械密封装置。为了提高密封的可靠性和寿命,一般采用多级串联的轴封系统,并在最为关键的 1 号轴封结构中采用动静压结合型非接触式端面密封结构。该结构的静环端面外侧加工有周向波度表面或等倾斜面,使其在和动环相对运动过程中即具有静压效应又具有动压效应<sup>[2]</sup>。尽管动静压结合型密封结构具有其他形式密封结构无可比拟的优点,但是由于周向波度密封环面形复杂,其制造技术一直是核主泵制造的瓶颈。周向波度密封环是典型的高

\* 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT14LAB02)和国家自然科学基金(51105057, 51475076, 51321004)资助项目。20140609 收到初稿, 20141225 收到修改稿

精度空间复杂曲面,沿周向按余弦曲线变化,沿径向按线性变化。根据文献[2-3]中的理论分析结果,端面波幅只有  $10\text{ }\mu\text{m}$  左右,波度面与密封坝平面的倾角只有  $0.05^\circ$  左右。此外,为满足核主泵密封环长期工作在高速、高压、高载状态的需求,其材料必须具备高刚度、高硬度和高热稳定性的特性,一般选择碳化钨、碳化硅、氮化硅等高硬度难加工材料。

目前从国外相关公开的技术资料中可以看到,磨削加工和激光加工是周向波度密封环的两种主要加工方法。LEBECK 等<sup>[4]</sup>提出了仿形磨床设计方案,即在控制砂轮进给的同时,通过仿形凸轮控制砂轮主轴线转角来生成锥形波度面。由于砂轮进给运动、仿形凸轮的形位公差、传动链的间隙、磨削过程的振动都可能产生微米量级的误差,很难实现只有  $10\text{ }\mu\text{m}$  波幅的曲面加工。为了解决砂轮磨损导致加工精度难以保证的问题,霍凤伟等<sup>[5]</sup>提出了利用杯形砂轮结合具有多轴联动功能的高精度超精密机床加工两类典型密封环的方法,并实现了圆锥面密封环的高精度加工。近几年,激光加工技术被用于复杂曲面密封环的加工。MULLER<sup>[6]</sup>利用激光技术加工出了“液体回流式”流体动压机械密封的槽型。BELLOSI 等<sup>[7]</sup>对采用 KrF 激光加工氧化铝密封环的可行性进行了研究。YOUNG 等<sup>[8]</sup>利用激光在碳化硅密封环的端面上加工出独特的周向波度。由于核主泵密封环多为陶瓷类材料,激光作用于异质表面出现材料去除不均问题,导致加工表面粗糙度增加。为了实现周向波度密封环加工,1989 年 YOUNG 等<sup>[9]</sup>所撰写的专利中提出采用变形加工的思想,通过热变形夹具使密封端面产生轴向弹性变形,然后通过研磨机将变形突起的波度区加工成平面,外力去除后,密封环端面即呈现波纹状表面。这种方法的优点是简单,但是随着波数的增加,使高刚度的硬质合金环变形非常困难,利用热变形夹具获得波纹面的形状精度也不易调整和控制。

针对核主泵密封环的面形复杂和材料的高硬度难加工特点,本文提出了周向波度动密封环的预变形平面研磨加工方法。通过特殊设计的夹具对密封环加载,实现密封环端面变形,使波度区表面高于坝面区,通过平面研磨将波度区研平,实现具有周向波度结构的密封环加工。预变形的产生是整个加工方法的关键技术,本文利用有限元分析方法,对密封环的预变形过程进行了仿真分析,研究了预变形载荷对密封环变形的影响。最后,通过夹具研制和材料去除工艺试验,对周向波度密封环预变形平面研磨加工方法进行了试验验证。

## 1 加工原理与夹具构型

周向波度密封环结构示意图如图 1 所示,宏观上是一个矩形截面圆环,微观上端面可以分为密封坝面区和波度区,是一个复杂的曲面。密封坝面区的平面度对密封性能十分重要,一般要求达到 2 个氦光带,表面粗糙度要达到  $R_a\ 20\text{ nm}$ 。波度区的波幅为  $10\text{ }\mu\text{m}$  左右,一般设计为 9 个波度。波度区的面形精度较坝面区低,但要有比较好的一致性。

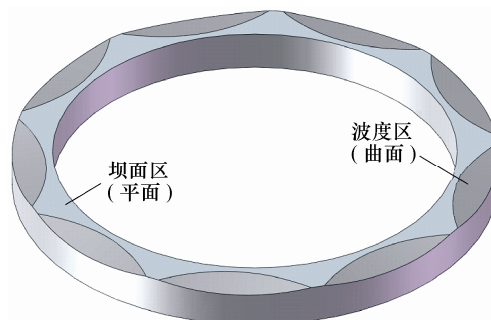


图1 周向波度密封环结构示意图

周向波度密封环预变形平面研磨加工技术的基本原理与过程示意图如图 2 所示。图 2a 是密封环截面和预变形夹具的初始状态,首先,通过弹性预变形夹具实现密封环周向扭转变形(图 2b),使端面产生和预加工面形互补的预变形,然后对预变形后的表面进行平面研磨加工,直至波纹区研平(图 2c),释放预变形夹具所施加的预应力后,密封环弹性变形恢复,坝面区形成(图 2d)。在周向等距分布与波纹数一致的加载点,并在每两个加载点间增加一个反向作用加载点,通过平面研磨并释放预应力后便可以获得具有周向波度结构的密封环。

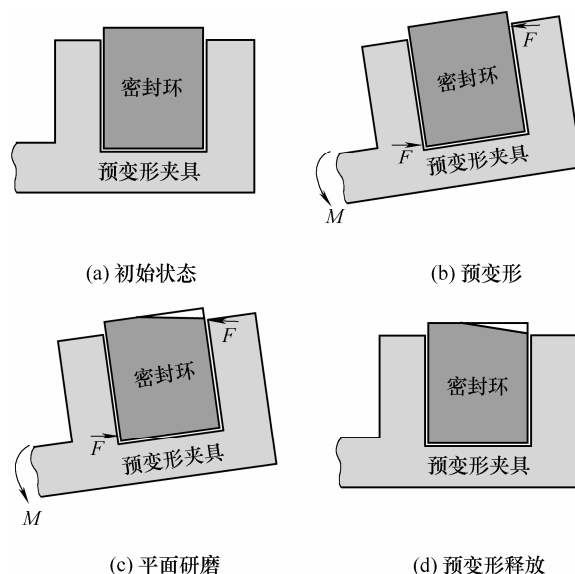


图2 预变形平面研磨加工原理示意图

图 3 所示为所设计夹具的结构图。图中拉力杆和推力杆分别施加反向的扭矩，力矩的大小由施加在螺钉上的力来控制。用于加载的两种结构通过螺钉和底座盘相连，实现定位和固定。密封环材料为碳化钨硬质合金，局部受力情况和图 2 中所示一致。加载杆和底座盘相连的支撑杆部分比较薄，只起到垂直方向支撑作用，抗弯刚度较小。这种设计使得密封环预变形过程中的径向位移约束变弱，结构变形协调性提高。此外低刚度支撑杆提供力矩的能力有限，使得加载点的力矩和螺钉加载引起的力矩基本平衡，容易进行加载点的力矩控制。

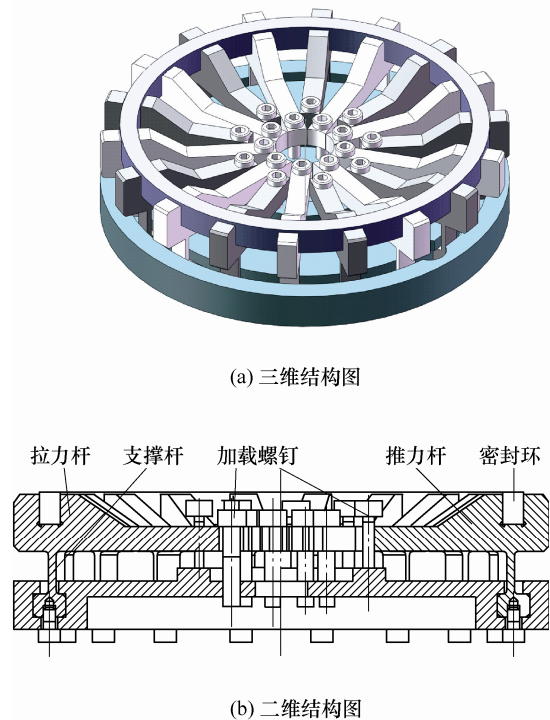


图 3 预变形夹具结构图

2 预变形过程有限元分析

2.1 有限元分析模型

为了通过预变形平面研磨技术实现周向波度密封环的加工，最关键的是要通过预变形夹具获得与预加工波度表面互补的端面变形。为此，利用有限元模拟技术对预变形过程进行了分析。根据结构对称性和周期性，建立如图 4 所示的 1/18 有限元模型，模型包括 1/2 拉力杆，1/2 推力杆，1/18 密封环，1/18 底座盘和两个 1/2 螺钉，在所有接触面建立接触单元，在周向边界上建立对称边界条件，有限元分析利用通用软件 ANSYS 实现，螺钉加载过程采

用螺钉预应力加载实现。结构参数见表 1。

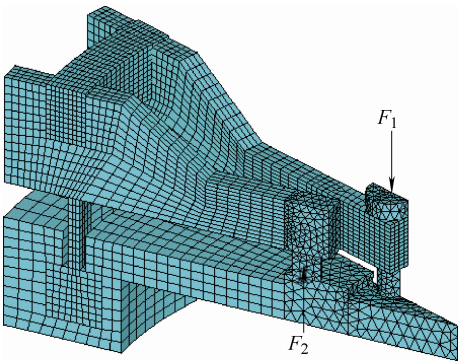


图 4 密封环预变形分析有限元模型

表 1 分析模型参数

变量	值	变量	值
密封环外径 $D/\text{mm}$	145	拉力杆力臂长度 $l_l/\text{mm}$	54
密封环径向宽度 $\sigma/\text{mm}$	6.0	推力杆力臂长度 $l_p/\text{mm}$	42.5
密封环轴向厚度 $\delta/\text{mm}$	10	密封环弹性模量 $E_r/\text{GPa}$	500
拉、推杆厚度 $t/\text{mm}$	8	夹具弹性模量 $E_f/\text{GPa}$	210
支撑杆厚度 $t_s/\text{mm}$	2	夹具材料屈服应力 $\sigma_0/\text{MPa}$	355
支撑杆长度 $h/\text{mm}$	12	夹具材料硬化模量 $E_0/\text{GPa}$	1.45

2.2 预紧力对密封环端面变形的影响

在预变形夹具中，拉力杆加载点通过螺钉施加向下的拉力  $F_1$ ，推力杆加载点通过螺钉施加向上的推力  $F_2$ 。预变形过程中的线性度对变形的控制和调整非常重要，而接触和材料局部屈服都会引起结构变形的非线性，为此在夹具设计过程中对夹具的几何参数进行了优化设计，表 1 中所示是优化后的夹具结构设计参数，主要以强度约束条件下夹具对密封环施加最大扭矩为目标，对支撑杆的几何参数，以及拉、推杆的几何参数等进行了优化设计，具体分析过程在本文中不进行论述。

图 5 和图 6 分别是在拉力杆和推力杆的加载螺钉上施加不同的预紧载荷条件下，密封环 1/18 端面的轴向变形云图。在拉力杆载荷作用下，变形后的密封环外圆周高于内圆周，趋势和所需要的波度密封环互补结构一致，当拉力杆载荷从 100 N 到 400 N 变化时，变形分布趋势基本一致，变形量和载荷近似呈线性关系，当载荷从 300 N 到 400 N 变化时，变形增幅减小，这是由于拉力杆和密封环的接触区开始出现塑性变形。在拉力杆载荷为 0 的条件下，随着推力杆载荷从 50 N 增加到 200 N 条件下，密封环端面轴向变形和载荷基本呈线性关，没有明显的结构塑性屈服的特征，变形趋势和拉力杆作用时正好相反。此外，考虑到拉力杆和推力杆的力臂长度

不同(表 1), 在载荷绝对值相同的条件下, 拉力杆和推力杆施加的扭矩比值为 1.27, 而正负扭矩引起的变形并没有很好的线性度, 这是由于接触相关的边界非线性引起的。

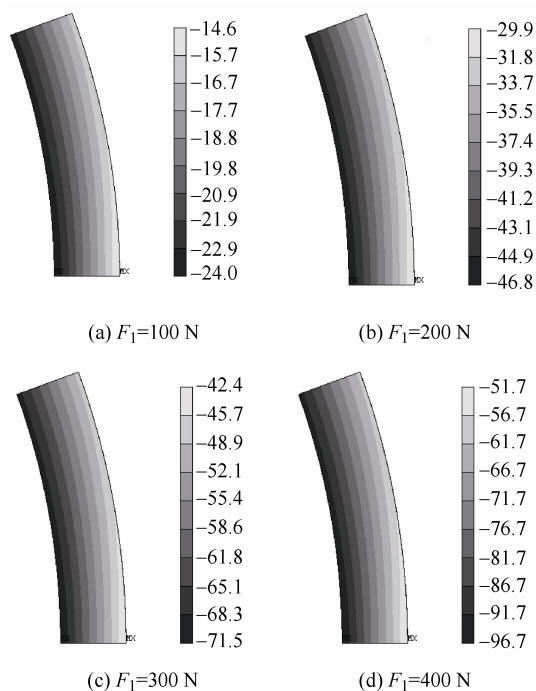


图 5 拉力杆预紧力对密封环端面轴向变形的影响( $\mu\text{m}$ )

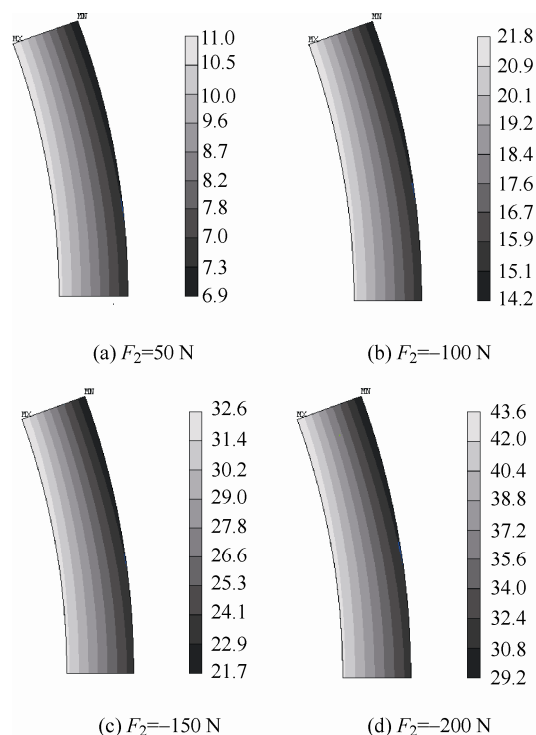


图 6 推力杆预紧力对密封环端面轴向变形的影响( $\mu\text{m}$ )

从图 5 和图 6 的分析结果可以看到, 单独通过拉力杆或推力杆加载, 所获得的变形近似成轴对称,

波度并不明显。通过对端面外圆周方向的变形进行分析发现(图 7), 在拉力杆作用力小于 300 N 的条件下, 密封环端面外圆周方向的变形与载荷成线性关系, 产生的波度近似为拉力杆  $0.015\text{ }\mu\text{m/N}$ , 推力杆  $0.01\text{ }\mu\text{m/N}$ 。

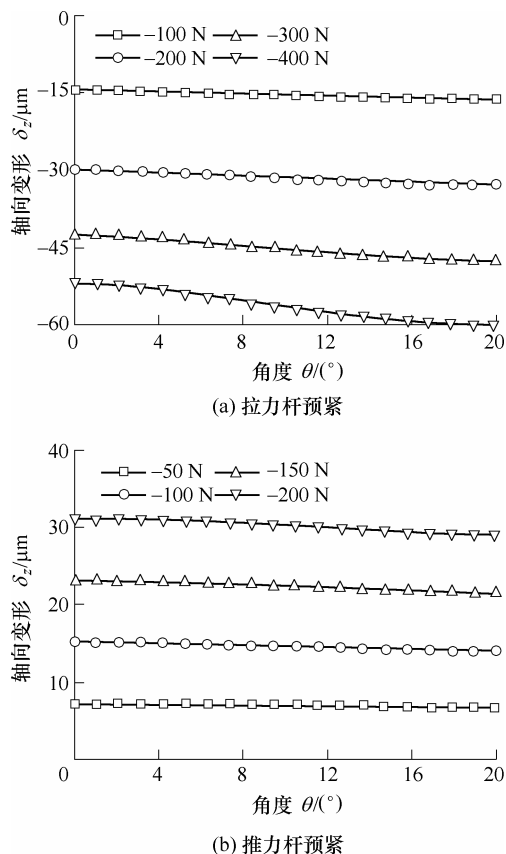


图 7 预紧力与密封环端面外边界轴向变形的关系

在拉力杆 200 N 条件下, 整个端面的变形已经达到  $16.9\text{ }\mu\text{m}$ , 而外圆周波度只有  $2.9\text{ }\mu\text{m}$ , 波锥比达不到要求。根据文献[2]的分析结果, 波度过小的密封环只有静压效应, 动压效应不明显, 而锥度过大又会导致承载力下降。为了提高波锥比, 必须在控制端面径向变形的条件下, 增加外圆周的波度。从分析结果发现, 拉力杆和推力杆载荷引起的端面变形趋势相反, 而外圆周波度的相位一致。因此, 在共同作用下, 产生的锥度可以减弱, 而波度可以迭加, 实现减小锥度同时增加外圆周波度的目的, 获得满足要求的波锥比。图 8 所示为拉力杆载荷 300 N, 推力杆载荷分别为  $-100\text{ N}$  和  $-200\text{ N}$  条件下的端面变形分析结果, 可以看到, 随着拉力杆载荷的增加, 外圆周方向的波度明显增加, 推力杆载荷为  $100\text{ N}$  时, 外圆周方向波幅为  $6.5\text{ }\mu\text{m}$ , 整个端面的相对变形为  $20.1\text{ }\mu\text{m}$ , 当推力杆载荷  $200\text{ N}$  时, 波度达到  $7.4\text{ }\mu\text{m}$ , 而整个端面的相对变形为  $13.9\text{ }\mu\text{m}$ 。



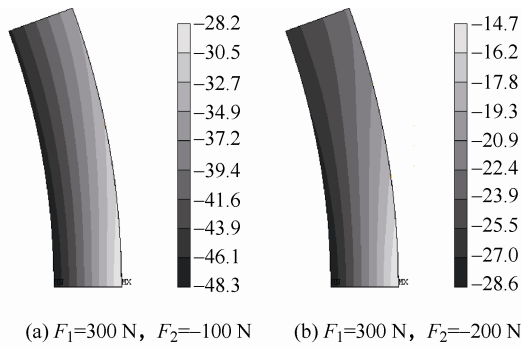


图 8 拉力杆和推力杆共同作用下的密封环端面轴向变形

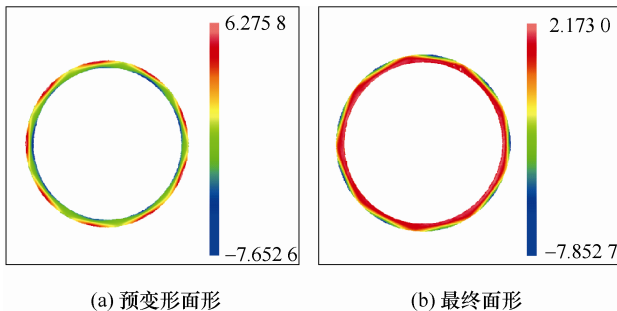
### 3 试验验证

通过理论分析发现, 利用变形夹具使密封环端面产生周向波度面形是可行的, 为了进一步验证利用预变形平面研磨方法加工周向波度密封环的可行性, 研制了密封环预变形夹具, 图 9 所示是安装有硬质合金密封环的预变形夹具实物图。



图 9 密封环预变形夹具实物图

根据分析得到的预变形加载载荷, 通过换算成螺钉加载扭矩后利用扭力批对 18 个加载螺钉进行加载并根据面形测试结果进行微调。图 10a 所示为利用平面度仪测试获得的密封环端面形, 变形幅值为  $13.9 \mu\text{m}$ 。以金刚石微粉作为磨料, 利用平面研磨机对变形后的密封环端面进行研磨, 去除高度约为  $8 \mu\text{m}$  左右, 图 10b 是密封环从夹具卸下后测得的密封环端面面形, 可以看到明显的周向波度特征, 波幅约为  $6 \mu\text{m}$ , 差异小于  $1 \mu\text{m}$ , 密封环端面的粗

图 10 密封环端面预变形面形及加工后面形( $\mu\text{m}$ )

糙度小于  $R_a 5 \text{ nm}$ 。预变形过程中, 密封环整体所受的最大应力约为  $300 \text{ MPa}$ , 密封端面出的最大应力约为  $200 \text{ MPa}$ , 远小于镍基硬质合金材料的强度( $1 \text{ GPa}$  以上), 产生微损伤的可能性非常小。

### 4 结论

(1) 提出了周向波度密封环的预变形平面研磨加工方法, 设计了预变形夹具, 并分析预紧力作用下的密封环端面变形特征, 通过周期性反向扭矩的作用, 获得了具有明显波度和锥度结构特征的密封环端面变形;

(2) 通过预变形夹具研制, 结合平面研磨工艺, 实现的周向波度密封环的预变形平面研磨加工, 外圆周波幅可以达到  $6 \mu\text{m}$ , 端面整体面形 PV 值为  $10 \mu\text{m}$ 。

### 参考文献

- [1] 王玉明, 黄伟峰, 李永健. 核电站一回路用机械密封[J]. 摩擦学学报, 2010, 31(4): 408-416.  
WANG Yuming, HUANG Weifeng, LI Yongjian. Mechanical seals for primary circuit of nuclear power plants [J]. Tribology, 2010, 31(4): 408-416.
- [2] 王晓雪, 刘莹, 李京浩, 等. 核主泵用动静压波度机械密封机理[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 131-135.  
WANG Xiaoxue, LIU Ying, LI Jinghao, et al. Mechanism of combined coning and waviness mechanical face seal for nuclear reactor coolant pump [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 131-135.
- [3] 孙赫, 张秋翔, 蔡纪宁, 等. 端面周向波度密封中流场的数值模拟[J]. 润滑与密封, 2011, 36(5): 63-67.  
SUN He, ZHANG Qiuxiang, CAI Jining, et al. Numerical simulation of flow field in end face seal with circumferential waviness [J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(5): 63-67.
- [4] LEBECK A O, YOUNG L A. Wavy tilt dam seal ring and apparatus for shaping seal rings: US, 4887395 [P]. 1989-06-06.
- [5] 霍凤伟, 郭东明, 冯光, 等. 核主泵用流体动压密封环复杂形面超精密磨削[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 184-191.  
HUO Fengwei, GUO Dongming, FENG Guang, et al. Ultra-precision grinding of the complex surfaces of hydrodynamic seal rings used in reactor coolant pumps [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 184-191.

184-191.

[6] MULLER H K. Floating ring seal with return structures and process for making it: US, 5529317 [P]. 1996-06-25.

[7] BELLOSI A, DAURELIO G, CHITA G, et al. UV laser ablation of alumina ring faces for mechanical seal applications [J]. Appl. Phys. A, 1999, 69 (Suppl.): 539-542.

[8] YOUNG L A, KEY B, PHILIPS R, et al. Mechanical

seals with laser machined wavy SiC faces for high duty boiler circulation and feed water application [J]. Lubrication Engineering, 2003, 59(4): 30-39.

[9] YOUNG L A. Method for forming a wavy face ring: US, 5833518[P]. 1998-11-10.

作者简介: 周平(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为超精密加工技术和表面功能结构设计与制造。

E-mail: pzhou@dlut.edu.cn

#### 第 4 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

### 基于广义局部频率的非线性非平稳信号故障特征提取方法研究

作者: 唐友福

毕业学校: 上海大学

指导教师: 刘树林

振动信号的特征提取一直是设备状态监测及故障诊断领域的研究前沿, 特别是大型复杂装备系统早期故障、微弱故障及多源复合故障的非线性非平稳信号特征提取问题存在着更大的困难, 已成为该领域最具挑战性的研究热点。基于对频率内涵本质的重新考察和认识, 本文提出了广义局部频率新概念, 深入开展了适于非线性非平稳信号故障特征提取方法研究, 并成功应用于往复压缩机多源冲击振动故障特征的提取。该研究对信号频谱及时频分析理论发展具有重要科学意义, 对具有非线性非平稳信号特点的其它工程领域的特征提取也具有广泛的应用前景。

在频谱及时频分析方法中广泛应用的全局频率(即周期的倒数)与瞬时频率(即相位的导数)概念, 分别在描述信号的整体概貌及局部细节特征方面发挥了重要作用。然而, 它们在表征非线性非平稳信号特征方面仍然存在局限性, 为此, 本文提出了广义局部频率新概念及其定义, 通过构造广义局部频率的频域和时频域表达方法, 使其兼容全局频率和瞬时频率优势的同时, 克服了全局频率概念只对周期信号才具有物理意义而无法描述频率及幅值随时间变化非周期信号特征的缺陷, 弥补了瞬时频率只对窄带信号才能给出合理解释而损失众多大尺度频率信息的不足。此外, 通过仿真实例, 对广义局部频率概念的适用性进行验证, 表明了广义局部频率定义的准确性。

以短时 Fourier 变换、小波变换、Wigner-Ville 分布、Chirplet 变换、EMD 及 LMD 等为基础的时频分析方法, 在旋转机械的典型故障诊断过程中发挥着非常有效的作用。但是, 随着故障诊断领域向着大型复杂装备系统的延伸, 振动信号表现出较强的非线性、非平稳及非高斯等复杂特性, 时频分布变得非常复杂, 频带与故障激励之间缺乏映射关系, 许多频率成分物理意义不明确, 难以提取出足以识别故障的有用特征信息。为此, 本文提出了基于自适应波形分解的广义局部频率时频分析方法, 实现了多分量非平稳信号的广义局部频率时频特征提取, 摆脱了现有时频分析方法依赖先验知识将信号按基函数展开思想的束缚, 具有良好的自适应性。此外, 为了减少噪声对非平稳信号时频分析的影响, 提出了将自适应波形分解与互信息法相融合的降噪技术, 通过仿真实例对比, 验证了其有效性。

功率谱图出现连续谱峰及噪声背景等现象往往作为辨识系统处于混沌状态的重要依据。但是, 功率谱是以平稳假设为前提, 在分析具有非平稳性的非线性时间序列时存在明显缺陷。为此, 本文提出了基于广义局部频率的频域分析方法, 以 Duffing 系统为对象, 揭示了系统演化过程中的频域分岔现象, 克服了功率谱分析时产生的虚假频率信息, 有效表征了不同系统状态下非线性时间序列频域结构特点及分布规律。另外, 通过基于自适应波形分解的广义局部频率解调分析, 发现了混沌时间序列具有频率调制特性及频率调制的相似性特征。

广义局部频率频域和时频域特征量虽然能够准确形象地描述非线性非平稳信号本质信息, 但其特征值受噪声及样本选取的影响, 不同信号特征量级差别较大, 分析结果的可比性、可重复性及稳定性较差。为了弥补这方面的不足, 本文应用 Lempel-Ziv 复杂度方法, 定量分析了广义局部频率时频特征的复杂性, 揭示出的信号时频结构相对于时域结构更加简洁、物理意义更加明确, 更能够准确辨识各信号特征类型。通过对滚动轴承振动信号的实例分析, 进一步验证了广义局部频率时频特征提取及其复杂度分析的有效性。

往复压缩机多源冲击振动信号表现出较强的非线性非平稳特征, 现有时频分析方法难以提取出足以识别故障的特征信息, 在本文理论研究基础上, 应用广义局部频率谱分析与时频分析方法, 有效揭示了气阀不同状态下振动信号的整体概貌统计特征及局部细节时变特征, 为往复压缩机气阀故障诊断提供了更加丰富及意义明确的特征依据。另外, 应用 Lempel-Ziv 复杂度方法对气阀信号的时域与时频域特征进行复杂度分析, 结果表明气阀信号的广义局部频率时频特征结构相比于时域结构更加简洁, 在一定程度上降低了噪声带来的随机性干扰, 更能够有效表征不同气阀状态的非线性关系, 并分别给出了其 LZC 特征的定量参考标准, 为往复压缩机气阀故障诊断提供了参考依据。