

# 基于ANSYS Workbench的 圆周石墨密封动态性能研究

程瑶, 常城, 胡海涛, 刘颖  
(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

**摘要:** 基于ANSYS Workbench分析平台, 针对圆周石墨密封设计、使用中发现问题, 提出了圆周石墨密封全尺寸三维动态仿真分析方法, 并使用此方法对圆周石墨密封进行了动态性能分析。结果表明, 该仿真分析方法较好地反映了动态条件下, 尤其是转子涡动情况下密封环的动态响应, 可用于研讨转子涡动、封严压差、弹簧弹力、摩擦系数以及密封环结构等因素对密封环与跑道间动态间隙的影响规律。利用此动态仿真分析方法, 可为圆周石墨密封的气体泄漏率计算、弹簧力设计、结构设计等提供技术牵引, 同时也为圆周石墨密封的正向设计提供了理论基础。

**关键词:** 航空发动机; 圆周石墨密封; 转子涡动; 弹簧弹力; 密封间隙; 摩擦系数; 气体泄漏量; 动态分析

**中图分类号:** V233.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2020) 06-0045-06

## Dynamic performance analysis of the circumferential graphite seal based on ANSYS Workbench

CHENG Yao, CHANG Cheng, HU Hai-tao, LIU Ying

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** A full-size three-dimensional dynamic analysis approach of circumferential graphite seal was created based on ANSYS Workbench to solve the problems occurred during the design and the use. Based on the approach, the dynamic performance of circumferential graphite seal was simulated. The results show that the analysis approach can simulate the dynamic characteristic of sealing ring under dynamic conditions, especially under rotor whirling condition. This analysis method can be used to analyze the relationship between rotor whirling, sealing pressure, spring force, friction coefficient, seal ring structure and clearance of circumferential seal. Furthermore, it can provide the technical support for leakage calculation, spring design and structure design of circumferential seal to found a theoretical basis for circumferential graphite seal design.

**Key words:** aero-engine; circumferential graphite seal; rotor whirling; spring force; seal clearance; friction coefficient; gas leakage; dynamic analysis

## 1 引言

圆周石墨密封作为一种已在航空发动机轴承腔中成功应用的密封形式, 其主要优点有技术成熟度高、许用密封压差高、结构紧凑以及不限制转子的轴向窜动等<sup>[1-3]</sup>。随着先进发动机中弹性支撑和齿轮传动涡扇等新技术的广泛应用, 对圆周石墨密封提出了更高的要求, 即不仅要有更高的使用温度和线速度, 还应具有承受转子涡动的能力<sup>[4-6]</sup>。

目前, 国内外圆周石墨密封研究主要集中在密封材料、密封结构对密封性能的影响, 以及密封静态特性等方面<sup>[7-11]</sup>。对于圆周石墨密封装置的零件设计, 主要依靠文献及经验数据, 即根据经验数据确定结构尺寸, 并完成密封性能分析。如圆周石墨密封的弹簧力设计, 就是参照文献及经验值来选定并计算。但在实际工作中, 弹簧力越大, 密封环与密封跑道之间的摩擦发热量也越大, 因此, 设计需要的是既

能减少摩擦发热量,又能满足圆周密封随动性及贴合性要求的弹簧力,只单纯依靠文献及经验数据很难实现这一要求。此外,由于制造误差以及轴承游隙等原因,转子的质心一般不会与轴的回转轴心重合,从而导致转子在运行过程中产生涡动,对圆周石墨密封环与跑道间的接触产生直接影响,进而影响圆周石墨密封的磨损和气体泄漏量。目前评估圆周石墨密封气体泄漏量也主要依靠试验数据,对于气体泄漏通道的形成机理并未做详细解释。而关于转子涡动对圆周密封动态性能影响的研究更是少见,因此开展转子涡动对圆周密封动态性能影响的研究具有重大的理论及实际意义。

本文基于 ANSYS Workbench 分析平台,提出了圆周石墨密封全尺寸三维动态仿真分析方法,分析了转子涡动对圆周石墨密封性能的影响,获得了转子涡动、弹簧弹力和摩擦系数等参数对密封间隙的影响规律,以及密封间隙对气体泄漏量的影响关系。此分析方法可为圆周石墨密封的气体泄漏率计算、弹簧力设计、结构设计等提供技术牵引。

## 2 动态分析模型构建

### 2.1 基于 ANSYS Workbench 的动力学分析

结构动力学分析的目的,是在动力载荷作用下,确定结构的内力、位移、反力等量值随时间的变化规律,找出最大值作为设计分析的依据。动力分析方程如式(1)、式(2)所示。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \sum_{j=1}^{N_m} \beta_j^m [K_j] + \sum_{k=1}^{N_e} [C_k] \quad (2)$$

式中:[ $M$ ]为质量矩阵,[ $C$ ]为阻尼矩阵, $\alpha$ 为质量矩阵乘子, $\beta$ 为刚度矩阵乘子,[ $K$ ]为结构刚度矩阵, $N_m$ 为具有材料阻尼的材料数目, $\beta_j^m$ 为材料 $j$ 的刚度矩阵乘子, $K_j$ 为材料 $j$ 的结构刚度矩阵, $C_k$ 为一些单元特有的单元阻尼阵, $N_e$ 为具有特有单元阻尼的单元数目。

### 2.2 转子运动轨迹方程

为研究密封装置在转子涡动条件下的动力学性能,在进行圆周石墨密封非稳态计算前,需先确定转子涡动时与密封对应的转子运动轨迹方程,即仿真分析的位移边界。根据动力学相关知识,当转子出现一个偏心转动(图1)后,其跑道外表面对应点的行程如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$y = e_0 + R - e_0 \cos(\omega t) - \sqrt{R^2 - e_0^2 \sin^2(\omega t)} \quad (3)$$

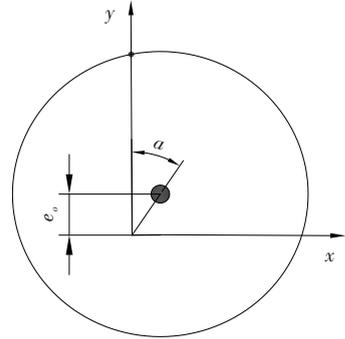


图1 转子偏心转动示意图

Fig.1 The eccentric motion of rotor

式中: $y$ 为转子行程, $R$ 为转子半径, $e_0$ 为转子径向偏移量, $\omega$ 为涡动频率, $t$ 为运动时间。

### 2.3 动态分析模型

图2为一典型的圆周石墨密封结构,主要由密封座、密封环、圆周拉伸弹簧、轴向压缩弹簧、卡圈、弹簧挡板以及跑道等组成。

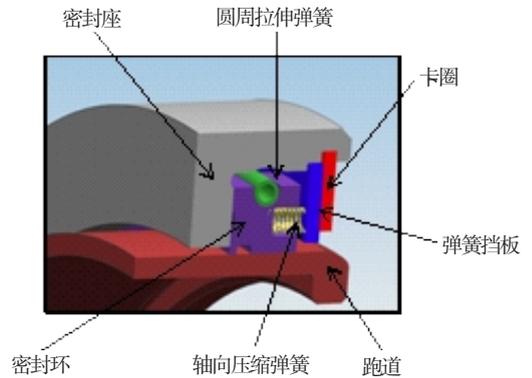


图2 圆周石墨密封

Fig.2 The circumferential graphite seal

密封环受到的作用力,主要有圆周拉伸弹簧的径向箍紧力、圆周压缩弹簧的轴向作用力、密封座或挡板对密封环的径向摩擦力以及气体不平衡压力。综合考虑圆周石墨密封的结构及受力,建立如图3

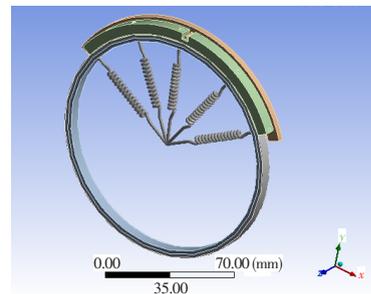


图3 圆周石墨密封动态分析模型

Fig.3 The dynamic analysis model of circumferential graphite seal

所示的仿真分析模型,主要包括一瓣密封环、挡板、弹簧、跑道、涡轮轴、防转销等。建模时主要考虑了以下几点:

(1) 取一瓣(圆周石墨密封为分瓣结构)用于动态分析。

(2) 将箍于密封环上的圆周拉伸弹簧等效为如图3所示的5个拉伸弹簧,这5个拉伸弹簧分别对应圆周石墨密封环凸台的位置,弹簧刚度计算方法见式(4)~式(7)。

(3) 挡板用于实现对密封环的轴向位移限制以及径向摩擦。

(4) 将跑道的转动和涡动分解为转子的自转及轴的公转。

(5) 防转销用于限制密封环的周向转动及径向活动范围。

$$F_r = \pi D f_{sr} \tag{4}$$

$$f_d = \frac{F_r}{3A} \tag{5}$$

$$K = \frac{F_r}{\pi(D_g - D_z)} \tag{6}$$

$$L_z = L_g - \frac{f_d}{K} \tag{7}$$

式中: $F_r$ 为弹簧产生的径向力, $D$ 为密封直径, $f_{sr}$ 为弹簧的单位径向力, $f_d$ 为单个弹簧力, $A$ 为等效弹簧个数, $D_g$ 为弹簧工作长度, $D_z$ 为弹簧自由长度, $K$ 为等效弹簧刚度, $L_z$ 为等效弹簧自由长度, $L_g$ 为等效弹簧工作长度。

### 3 加载及求解

#### 3.1 模型加载

根据圆周石墨密封的受力情况,为模型加载如图4所示。具体加载为:①在跑道上施加转速,实现跑道围绕自身轴线自转;②在涡轮轴上施加转速及

转子涡动量,以模拟转子涡动;③5个拉伸弹簧模拟圆周拉伸弹簧的作用,其加载方式为弹簧的刚度和自由长度;④在密封环外圆周表面施加除弹簧力以外的气体力;⑤在密封环的密封腔侧施加正压力,代替轴向压缩弹簧以及气体力的载荷。给定输入参数为:转速 10 000 r/min,转子涡动量 0.05 mm,摩擦系数 0.2,弹簧力 30 N/m。求解加载模型,即可得到分析结果。

#### 3.2 结果分析

为研究转子涡动作用下密封环与密封跑道之间的间隙变化,以密封环模型上与跑道接触的面作为观察点,取其径向位移。该径向位移与跑道对应点径向位移之差,即为密封环与跑道间的密封间隙。分析结果见图5~图7。由图5可看出,受转子自转及涡动作用影响,密封环随着转子的涡动做周期性径向运动,符合石墨环运动规律。根据图6和图7可知,转子刚开始转动第1圈时,密封环有轻微的不规则振动,到第2圈时趋于平稳。转子沿径向上升时,密封环跟随转子上升;但转子沿径向回落时,密封环的回落有一个迟滞时间。这就造成在转子从上升到下落的这一过渡时间段密封间隙最大,分析结果符合石墨环运动规律。

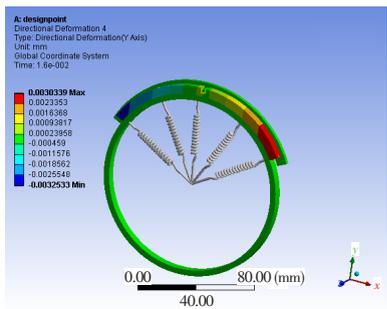


图5 圆周石墨密封径向变形分布

Fig.5 The radial deformation distribution of circumferential graphite seal

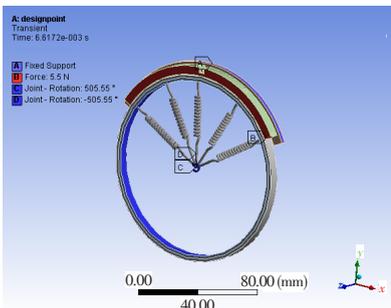


图4 圆周石墨密封的加载示意图

Fig.4 The load on the FEM

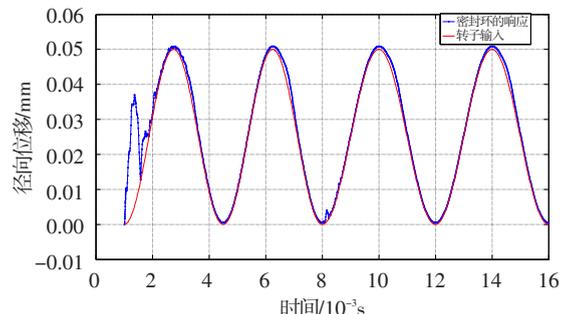


图6 转子涡动时密封环的动态响应

Fig.6 The dynamic response of sealing ring in rotor whirling

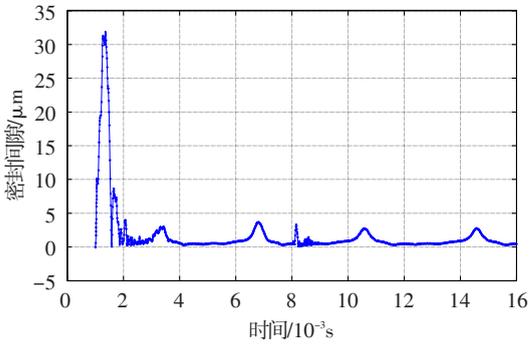


图7 转子涡动时密封环的密封间隙

Fig.7 The seal clearance of sealing ring in rotor whirling

为了与图6、图7的结果对比,将转子涡动量加大至0.16 mm、弹簧力减小至15 N/m进行分析,结果如图8、图9所示。由图可知,当转子涡动量增加且弹簧力减小时,密封环的随动性明显变差,密封间隙显著增大。

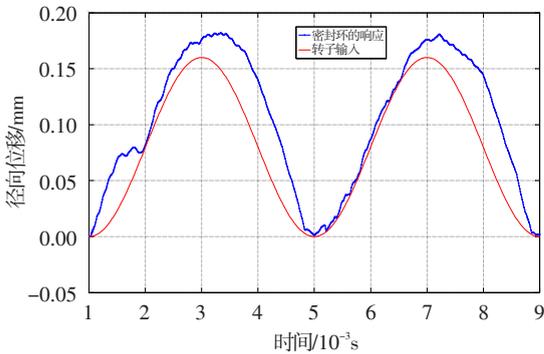


图8 参数更改后转子涡动时密封环的动态响应

Fig.8 The dynamic response of sealing ring in rotor whirling with modified parameters

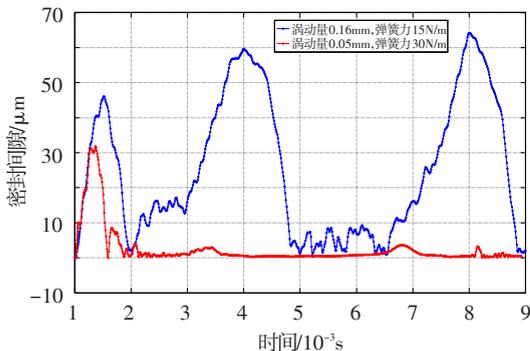


图9 参数更改后转子涡动时密封环的密封间隙

Fig.9 The seal clearance of sealing ring in rotor whirling with modified parameters

### 4 密封间隙影响因素分析

#### 4.1 转子涡动对密封间隙的影响

按3.1节中的模型参数设置,将转子的涡动量从

0.05 mm 逐步增加到0.20 mm,对圆周石墨密封进行动态分析,得到不同转子涡动量下密封间隙的变化,如图10~图12所示。可以看出,随着转子涡动量增加,密封间隙逐渐增大,且涡动量越大,密封间隙增大的幅值越大。

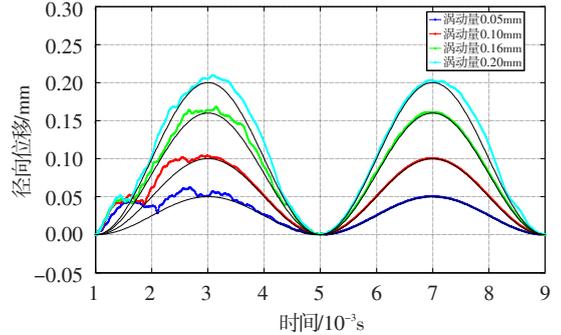


图10 不同转子涡动量时密封环的动态响应

Fig.10 The dynamic response of sealing ring under different rotor whirling

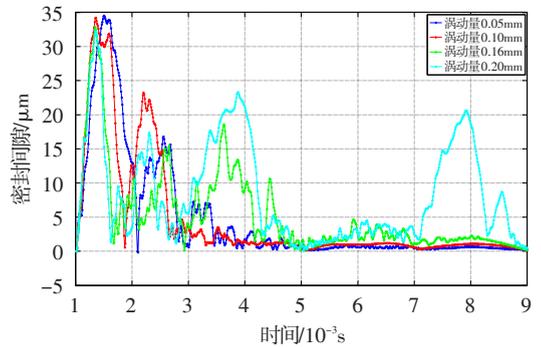


图11 不同转子涡动量时的密封间隙

Fig.11 The seal clearance under different rotor whirling

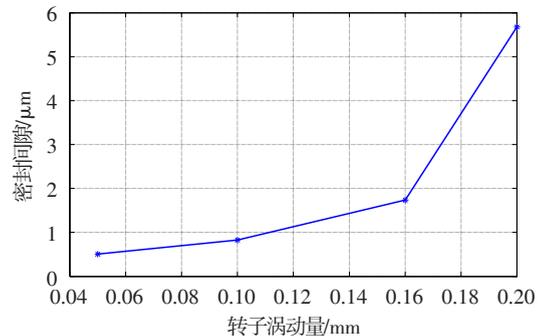


图12 密封间隙随转子涡动量的变化趋势

Fig.12 The trend of seal clearance with different rotor whirling

#### 4.2 摩擦系数对密封间隙的影响

按3.1节中的模型参数设置,将密封环与挡板间摩擦系数由0.09逐渐升高到0.30,得到不同摩擦系数对密封间隙的影响,如图13、图14所示。可以看出,随着摩擦系数增大,密封间隙显著增大。

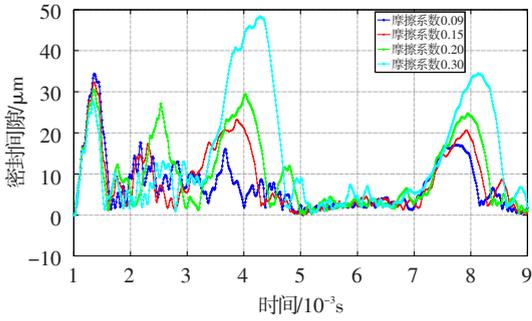


图 13 不同摩擦系数时的密封间隙

Fig.13 The seal clearance under different friction coefficient

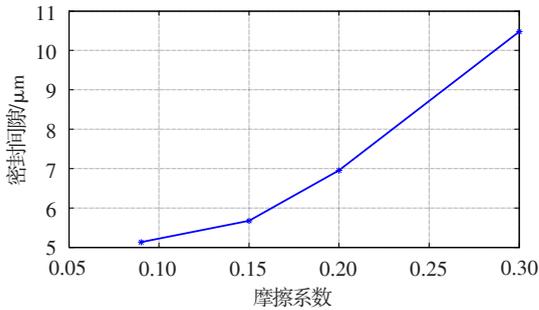


图 14 密封间隙随摩擦系数的变化趋势

Fig.14 The trend of seal clearance with different friction coefficient

### 4.3 弹簧弹力对密封间隙的影响

按 3.1 节中的模型参数设置,将周向弹簧力从 20 N/m 增大到 50 N/m,对圆周石墨密封进行动态分析,得到不同周向弹簧力作用下密封间隙的变化,如图 15、图 16 所示。可以看出,随着周向弹簧力增大,密封环径向位移明显趋于平稳,密封间隙也呈明显减小的趋势。

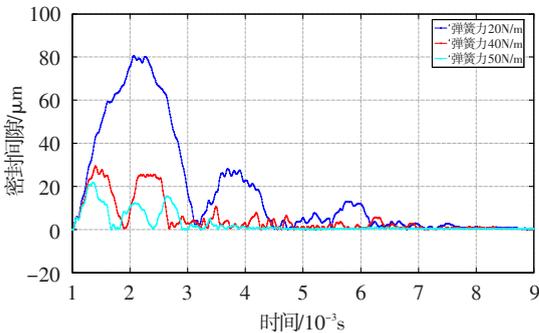


图 15 不同弹簧力时的密封间隙

Fig.15 The seal clearance under different spring force

根据此圆周石墨密封动态性能分析方法,可分析弹簧力对密封间隙的影响规律,从而根据分析结果优化弹簧力数值,使其既能尽量减少密封环的摩擦发热,又能满足石墨密封的随动性及贴合性要求。

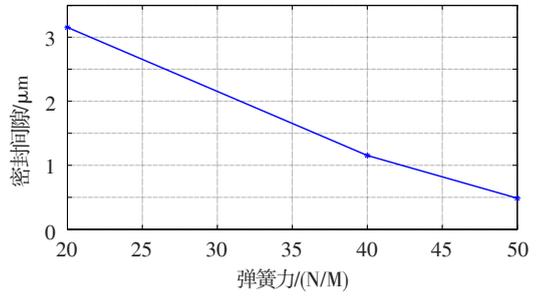


图 16 密封间隙随弹簧力的变化趋势

Fig.16 The trend of seal clearance with different spring force

## 5 密封间隙对气体泄漏量的影响

圆周石墨密封的密封间隙分为两部分,一部分是密封环加工精度产生的静态间隙,此间隙产生静态泄漏量;另一部分是本文所计算的动态间隙,此间隙产生动态泄漏量。已知密封间隙时,假设通过密封面的气体流动为同心圆柱环形缝隙流动(图 17),可根据式(8)计算气体泄漏量<sup>[13]</sup>。

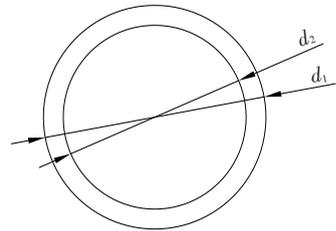


图 17 同心圆柱环缝

Fig.17 The concentric ring slit

$$Q = \frac{\pi D h_r^3 \Delta p}{12 \mu l} \tag{8}$$

式中: $Q$ 为气体泄漏量; $h_r$ 为密封副密封间隙,即图 17 中  $d_1$ 与  $d_2$ 间的间隙值; $\Delta p$ 为压差; $\mu$ 为动力黏度; $l$ 为密封面宽度。

将不同工况下分析得到的密封副密封间隙值带入式(8)进行计算,即可得到不同工况下圆周石墨密封气体泄漏量的变化规律,见图 18。可看出,气体

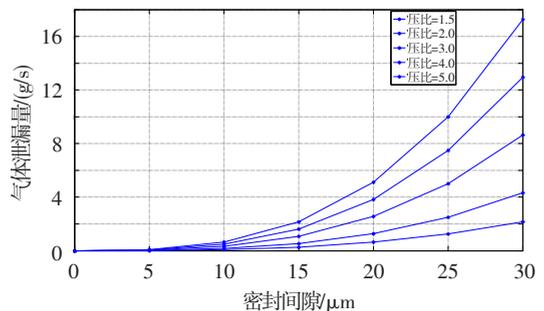


图 18 气体泄漏量随密封间隙的变化趋势

Fig.18 The trend of gas leakage with different seal clearance

泄漏量随密封间隙的增加呈非线性增大,当密封间隙超过  $10\ \mu\text{m}$  后气体泄漏量呈倍数增长。可见,通过控制密封间隙来控制泄漏量显得尤为重要。

## 6 结论

结合圆周石墨密封的使用情况和研究现状,基于 ANSYS Workbench 软件,提出了圆周石墨密封全尺寸三维动态仿真分析方法,并对圆周石墨密封的动态性能进行了分析,主要得出以下结论:

(1) 所提出的圆周石墨密封全尺寸三维动态仿真分析方法,能较好地反映动态条件下,尤其是转子涡动情况下密封环的动态特性。

(2) 转子涡动、弹簧弹力以及摩擦系数,均会对密封环的密封间隙产生影响。

(3) 密封间隙与气体泄漏量间的关系,可改变目前依靠经验值的设计现状,对圆周石墨密封环的弹簧力设计、结构设计等提供指导。

(4) 利用此方法可以仿真得到圆周石墨密封的动态间隙,进而得出气体动态泄漏量,可为圆周石墨密封结构设计、弹性元件设计等提供技术牵引,为圆周石墨密封的正向设计提供理论基础。

## 参考文献:

[1] 阎玉涛,李雪娟,胡广阳,等. 单环圆周密封装置设计和应用研究[J]. 航空发动机,2009,35(4):7—11.

(上接第35页)

[2] 赵刚,蔡元虎,屠秋野,等. 高空长航时无人机用涡扇发动机技术分析[J]. 推进技术,2009,30(2):154—159.

[3] Weinberg M, Wyzykowski J. Development and testing of a commercial turboprop engine for high altitude UAV applications[R]. SAE 2001-01-2972,2001.

[4] 郭捷,王咏梅,杜辉,等. 低雷诺数条件对涡扇发动机风扇/压气机性能和稳定性影响的试验研究[J]. 航空发动机,2004,30(4):4—6.

[5] 王奉明,程卫华. 高空长航时无人机用涡扇发动机关键技术分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2010,23(4):53—56.

[6] 尤·阿·李特维诺夫,弗奥·鲍罗维克. 航空涡轮喷气发动机的特性和使用性能[M]. 陈炳慈,译. 北京:国防工业出版社,1986.

[7] 沃尔什 P P,弗莱切 P. 燃气涡轮发动机性能[M]. 郑建弘,胡忠志,华清,等,译. 上海:上海交通大学出版社,2014.

[8] 屠秋野,陈玉春,苏三买,等. 雷诺数对高空长航时无人

[2] 胡广阳,阎玉涛,郑利胜,等. 航空发动机石墨圆周密封接触特性分析[J]. 润滑与密封,2018,43(11):111—116.

[3] 张家远,王利恒,顾健. 石墨密封基础理论与工程应用技术研究进展[J]. 装备制造技术,2018,282(6):99—106.

[4] 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.

[5] Allen G P. Self-acting lift-pad geometry for circumferential seal: a noncontacting concept[R]. NASA TP-1853,1980.

[6] 丁雪兴,王平西,张伟政,等. 螺旋槽干气密封环端面摩擦试验及其性能分析[J]. 化工学报,2017,68(1):208—214.

[7] 闫冬,王博文. 直升机减速器径向石墨密封的泄露特性分析[J]. 机械制造及自动化,2018,(2):35—37.

[8] 杨云鹏. 某型机械密封石墨环断裂分析与计算[J]. 化工学报,2017,68(2):3—4.

[9] 於秋萍,孙见君,涂桥安,等. 接触式机械密封基本性能研究进展[J]. 流体机械,2015,43(2):41—47.

[10] Kim S H, Ha T W. Prediction of leakage and rotor dynamic coefficients for the circumferential-groove-pump seal using CFD analysis[J]. Journal of Mechanical Science & Technology,2016,30(5):2037—2043.

[11] Hayden T S, Keller C H. Design guide for helicopter transmission seals[R]. NASA-CR-120997,1974.

[12] 郭丽,畅国勇. 基于 Pro/E 的发动机曲柄滑块机构运动仿真分析[J]. 机械研究与应用,2013,26(4):70—71.

[13] 林建忠,阮晓东,陈邦国,等. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

机发动机调节计划和性能影响[J]. 推进技术,2005,26(2):125—128.

[9] Wassell A B. Reynolds number effects in axial compressors[R]. ASME 67-WA/GT-2,1968.

[10] 王进,骆广琦,陶增元. 雷诺数对压气机特性及发动机稳定性影响的计算和分析[J]. 航空动力学报,2002,18(1):20—23.

[11] 李国忠. 小型涡喷发动机燃油控制系统稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[12] 金如山,索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京:航空工业出版社,2016.

[13] 聂恰耶夫 IO H. 航空动力装置控制规律与特性[M]. 单凤桐,程振海,译. 北京:国防工业出版社,1999.

[14] 贝尔尼·麦克艾萨克,罗伊·兰顿. 燃气涡轮推进系统[M]. 颜万亿,谈琳妮,译. 上海:上海交通大学出版社,2014.

[15] GJB 243A-2004,航空燃气涡轮动力装置飞行试验要求[S].