径向入流冷却箔片型气体动压止推轴承气动和 热特性数值研究 *

高齐宏1、张靖周1、孙文静1,2、张镜洋3

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 北京动力机械研究所, 北京 100074;
 - 3. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:针对高转速箔片型气体动压止推轴承的热管理需求,在轴承运行状态稳定、弹性变形恒定的主要假设前提下开展了带冷却空气径向入流的三维流-固耦合数值模拟,以获得旋转速度、径向入流质量流量和气膜层出口方式对气动和热特性的影响。研究结果表明,气膜间隙出口方式对转盘表面压力分布具有明显的影响,相对于气膜间隙出口完全封严情形,无封严出口下径向入流可以贯通气膜层通道,使得转盘和止推顶箔冷却效果得以改善、径向入流压降减小,但同时也带来止推力下降10.7%~32.5%的负面影响;径向入流质量流量的增加不仅可以起到有效的冷却作用,而且对轴承止推力也起到了较好的增强作用;气膜间隙出口封严方式对转盘和止推顶箔冷却效果的影响在高转速下更为显著,对径向入流压降和止推力的影响则在较大的径向入流质量流量下较为明显,止推力增幅随流量变化从0.8%提升至23.3%,压降则提高了0.5%~15%。

关键词: 动压止推轴承; 气动性能; 热性能; 径向入流冷却; 流固耦合

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210697-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210697

Numerical Investigation on Aerodynamic and Thermal Characteristics of Hydrodynamic Foil Thrust Bearing with a Radial Cooling Inflow

GAO Qi-hong¹, ZHANG Jing-zhou¹, SUN Wen-jing^{1,2}, ZHANG Jing-yang³

- College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074, China;
 - 3. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In accordance with the need of thermal management of hydrodynamic foil thrust bearing with high rotational speed, a steady three-dimensional fluid-solid coupled numerical simulation is performed to illustrate the effects of rotational speed, radial inflow mass-rate and outlet scheme on aerodynamic and thermal behav-

^{*} 收稿日期: 2021-09-30; 修订日期: 2021-12-21。

基金项目: 航空基金 (201928052008); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20200448); 中国博士后基金站前特别资助 (2020TQ0143)。

作者简介:高齐宏,博士生,研究领域为传热传质。

通讯作者:张靖周,博士,教授,研究领域为传热传质。

引用格式: 高齐宏,张靖周,孙文静,等. 径向人流冷却箔片型气体动压止推轴承气动和热特性数值研究[J]. 推进技术, 2022, 43 (11): 210697. (GAO Qi-hong, ZHANG Jing-zhou, SUN Wen-jing, et al. Numerical Investigation on Aerodynamic and Thermal Characteristics of Hydrodynamic Foil Thrust Bearing with a Radial Cooling Inflow[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210697.)

iors of foil thrust bearing with a radial cooling inflow, by assuming that the bearing works in a stability condition with fixed elastic deformation. The results show that the outlet scheme of film-layer gap has an obvious influence on the pressure distribution on the rotating disc surface. Compared with the film-layer sealed outlet situation, the radial inflow is able to penetrate the film-layer gap in the unsealed outlet situation, improving the cooling capacity of rotating disk and top thrust foil as well as decreasing the pressure drop of radial inflow. However, a negative influence of 10.7%~32.5% reduction on the thrust bearing capacity is also introduced by this unsealed outlet scheme. The increase of radial inflow mass-rate not only enhances the cooling capacity, but also strengthens the thrust bearing capacity. In general, the effect of film-layer outlet scheme on the cooling capacity of rotating disc and top thrust foil behaves more pronouncedly under higher rotational speeds. Its influence on the pressure drop of radial inflow and the thrust bearing capacity is more significant under bigger radial inflow situations, where the increasing in thrust bearing capacity rises from 0.8% to 23.3% with mass-rate and the pressure drop increases by 0.5% to 15%.

Key words: Hydrodynamic thrust bearing; Aerodynamic performance; Thermal performance; Radial cooling inflow; Fluid-solid coupled

1 引言

箔片型气体动压轴承被视为是推进旋转机械微型化和高速化的一项具有变革性的技术[1],它利用高速旋转表面黏性剪切作用诱导的气体周向运动,在微小间隙内形成自润滑气膜,并基于楔形气膜间隙层内的动压压缩效应形成径向或轴向静压差,提供径向承载力[2-3]或轴向止推力[4-5]。在飞行器机载机电系统和微型涡轮机械中具有重要的应用背景。

弹性箔片气体动压轴承技术突破得益于长期以 来所开展的一系列基础和应用技术研究,涉及润滑 气膜、气-弹耦合、箔片构型、表面抗磨涂层和转子稳 定性等多学科基础科学问题和关键技术问题[6-11]。 随着飞行器机载机电系统向集约型和轻质化方向发 展,要求涡轮-压气机和电机等旋转机械的转速进一 步提升,在超高速状态下,弹性箔片气体动压轴承不 仅在结构动力学和空气动力学特性上面临着新的理 论和技术挑战,而且强剪切诱发的气动热效应将显 著体现。Peng等[12-13]通过数值模拟研究了温度场对 箔片轴承动力学特性的影响,指出工作温度环境在 低转速下对轴承承载能力的影响较小,但在高转速 下的影响则较为明显;Sim等[14]对气体动压轴承的热 特性进行了研究,指出轴承温度随转速变化的影响 随着轴承间隙比的减小而越发显著,箔片自身弹性 形变对温度场的影响远小于气膜间隙的影响; Aksoy 等[15]建立了强耦合的三维气-热-弹分析模型,研究 了弹性箔片轴承的气动和热特性,指出转速对于轴 承温升的影响显著大于轴承载荷的影响。

国内外研究人员对径向支撑箔片型气体动压轴

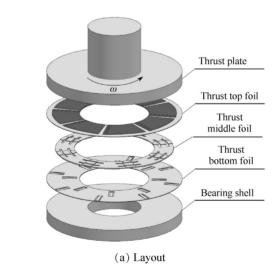
承的冷却问题已开展了一定的研究,Kim等[16]提出了 一种双流路冷却方案,即引入外部压缩空气分别在 转子和轴承套之间的间隙通道和转子空心轴通道形 成轴向通流,以输运黏性耗散热并冷却转子和箔片, 研究发现,转子和轴承套之间的间隙通流冷却对于 温度控制的作用更为主导,大约80%的黏性耗散热 量被其所迁移; Ryu 等[17-18]和 Shrestha 等[19]对轴向通 流和径向喷注等冷却方案进行了模型实验研究,Lee 等[20]和 Sim 等[21]针对微型涡轮发动机高温转子用箔 片型气体动压轴承的冷却通道进行多方案对比研究 和分析,Zhang等[22]对复合箔片型气体动压轴承的气 热特性及冷却方案进行了研究,分析了不同转速下 双流路冷却的载热比对轴承峰值温度的影响。相对 于径向支撑箔片型气体动压轴承,目前针对轴向止 推箔片型气体动压轴承的冷却研究还非常缺乏,Gad 等[23]对止推轴承径向入流的冷却方式进行了初步研 究,研究表明,通过止推轴承间隙强制进气具有良好 的冷却效果,其输运的热量可以占到轴承热负荷的 70%左右。

毫无疑问,在超高速弹性箔片气体动压轴承技术发展中,热管理设计已成为一个重要的研究命题,对箔片型气体动压止推轴承的气动热特性进行系统的研究并获得相应的冷却设计方法显得尤为必要。本文以一个多层箔片型气体动压止推轴承为研究对象,对径向冷却入流开展三维流动传热数值模拟,重点研究旋转速度、径向入流质量流量和出流方式对径向入流压降、温度分布以及轴承止推力的影响,以期为箔片气体动压止推轴承热管理设计提供应用基础。

2 计算模型和计算方法

2.1 物理模型及其简化

本文所研究的多层箔片型止推轴承结构如图 1 (a) 所示,它由止推盘、多层箔片(顶箔、中箔和底箔)以及轴承座构成。多层箔片结构可以通过弹性形变调整刚度分布,对转-静子系统的涡动能够形成有效的阻尼效应从而提高转子稳定性。其中,止推顶箔表面上周向均布的八组平箔-波箔片组件是主要的弹性支承和自适应变形元件,该平箔-波箔片组件凸起的高度从前缘向尾缘逐渐增大,形成如图 1(b) 所示的位于止推盘和顶箔间的周向变截面楔形收敛气膜间隙,进而产生动压效应形成轴向静压差来提供轴向止推力。图中, δ_{lop} 为记止推顶箔表面厚度, δ 为单组弹性平箔-波箔片组件高度, β 为倾斜段所对应的周向角, β_p 为总的周向角, β_0 为相邻组件间的周向间隙所对应的周向角; h_{max} 为在止推盘和顶箔间的最大气膜间隙厚度, h_{mix} 为最小气膜间隙。



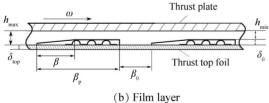


Fig. 1 Schematic of multi-layer foil thrust bearing

止推中箔为带有径向沟槽和周向缝槽的弹性箔片,δ_{mid}为总厚度,其上、下表面分别与止推顶箔表面和止推底箔贴合,通过径向沟槽和周向缝槽形成径向入流在箔片间的气流冷却通道,如图 2(a)所示,冷却气体自外缘环面径向入流后,经止推中箔与顶箔以及止推中箔与底箔间的狭缝通道,从内缘环面出

口排出。图 2(b)~(d)分别显示了三个典型周向截面上的箔片间局部流通示意图,在不同的周向截面上,径向入流的流动通道差异明显,它们通过止推中箔的周向缝槽形成相互串通。止推底箔为带有周向交错布置局部径向切槽弹性箔片,在运行中,贴敷在轴承座表面。

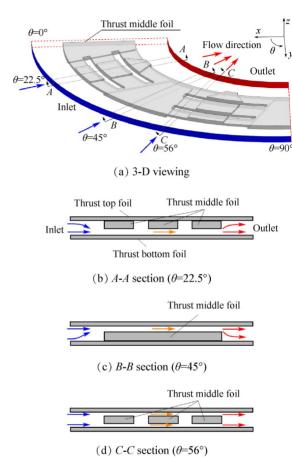


Fig. 2 Schematic of local flow passage

在弹性箔片气体动压轴承的实际运行中存在着弹性箔片的形变和周向的相对滑移,且工作环境也经历变化,是一个复杂的非定常气-热-弹耦合问题^[24-25]。鉴于本文主要关注径向冷却入流对气动及传热特性的影响,对此基于其主要的结构和工作过程特征,对物理模型作如下简化:

- (1)不考虑气体动压轴承启动、停车和变工况等 非稳定运行过程,即假设轴承运行状态稳定,因此, 弹性箔片组件可以简单处理为一个稳定运行状态下 弹性形变后的特定刚性结构;
- (2)由于小间隙盘缝中高速旋转剪切诱导的周向流动占主导机制,可以忽略冷却空气通流引起的 箔片气-弹变形,即稳定运行状态下弹性形变后的特 定刚性结构不受冷却空气通流的影响;

- (3)鉴于止推底箔主要起到弹性支撑和舒缓周 向形变的作用,对于径向冷却入流的流动几乎不具 有影响,因此,只计及止推顶箔和止推中箔的复杂 结构;
- (4)鉴于径向通流气流的热量输运作用占主导机制,忽略止推盘导热和轴承座散热对温度场的影响,将止推盘和轴承座表面视为绝热壁面。

简化后的物理模型见图 3,其中,止推顶箔和止推中箔的径向长度分别为 l_{top} 和 l_{mid} 。径向入流的进气和出气径向半径分别为 R_{in} 和 R_{out} 。

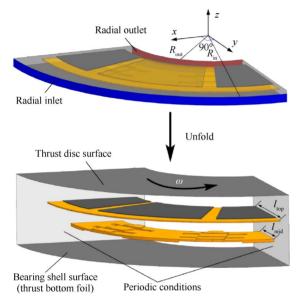


Fig. 3 Schematic of simplified physical model

箔片由镍基超级合金制成,其比热容和导热系数分别为502.48J/(kg·K)和15.9W/(m·K)。主要结构参数归纳见表1。

在实际工程应用中,为了更好地兼顾轴承的承载能力和冷却能力,对径向入流气流的出口进行局

Table 1 Main geometric parameters

Thickness $\delta_{ ext{top}}/ ext{mm}$	0.15
Length $l_{\mathrm{top}}/\mathrm{mm}$	11.5
Bump height δ /mm	0.15
Wedge-section angle $\beta/(\degree)$	20
Group angle $\beta_p/(\degree)$	40
Interval angle $oldsymbol{eta_0}/(^\circ)$	5
Thickness $\delta_{ ext{mid}}/ ext{mm}$	0.52
Length $l_{\scriptscriptstyle m mid}/{ m mm}$	6.65
Maximum gap $h_{\rm max}/{\rm mm}$	0.157
Minimum gap h_{\min}/mm	0.007
Inlet radius $R_{\rm in}/{ m mm}$	27.5
Outlet radius $R_{\rm out}/{\rm mm}$	10.95
	Length $l_{\mathrm{top}}/\mathrm{mm}$ Bump height δ/mm Wedge-section angle $\beta/(^{\circ})$ Group angle $\beta_{\mathrm{p}}/(^{\circ})$ Interval angle $\beta_{\mathrm{o}}/(^{\circ})$ Thickness $\delta_{\mathrm{mid}}/\mathrm{mm}$ Length $l_{\mathrm{mid}}/\mathrm{mm}$ Maximum gap $h_{\mathrm{max}}/\mathrm{mm}$ Minimum gap $h_{\mathrm{min}}/\mathrm{mm}$

部封严,以控制冷却空气在两个区域(气膜间隙区域和多级箔片区域)之间的分布,本文暂不考虑局部封严程度的影响,仅针对气膜间隙出口完全封严和无封严两种极端方式开展相关研究,如图4所示。对于气膜间隙出口完全封严情形,如图4(a)所示,径向入流只能经过止推底箔和止推顶箔间的冷却通道形成通流(即止推中箔气流冷却通道,见图2);对于气膜间隙出口无封严情形,如图4(b)所示,冷却气流从外缘环面径向入流后分成两股,分别经止推中箔气流冷却通道和气膜间隙通道形成通流,两股气流从内缘环面出口混合后排入周围环境。

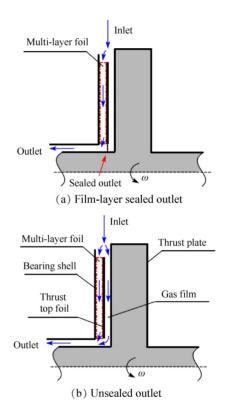


Fig. 4 Schematic of radial-throughout flow

2.2 数值计算方法及验证

在不考虑箔片弹性变形的条件下,采用定常、可 压缩的湍流时均流动换热控制方程进行流-固耦合 数值模拟,结合物理模型简化假设,在计算模型中作 如下处理:

- (1)流体为可压缩理想气体,其热物性参数随温度变化依据相关理论确定,即基于气体状态方程的密度、基于分子动能理论的比热和导热系数、以及基于Sutherland定律的黏性系数。
- (2)计及黏性耗散热影响,由于气膜微小尺度间隙中流动属于滑移流状态^[26],需要考虑滑移边界的影响。

采用二阶滑移速度模型处理滑移条件[27],即

$$v_{\rm slip} = \lambda \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\lambda^2}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$
 (1)

式中 γ 为壁面法向距离, λ 为气体分子平均自由行程。

$$\lambda = \frac{16}{5} \frac{\mu(T)}{p} \sqrt{\frac{R_{\rm g}T}{2\pi}} \tag{2}$$

式中 μ 为动力黏度,T为绝对温度,p为压力, R_s 为气体常数。

针对图 3 所示的计算模型,采用四分之一扇区作为计算域,相应的边界条件设置为:转盘给定旋转角速度 ω ,其值介于 $5\times10^4\sim1.2\times10^5$ r/min;外缘环面径向入流进口给定质量流量 m_g ,整个环面总的质量流量介于 $10\sim35$ kg/h,进口温度为 363K;出口设为压力出口,出口压力设为工作环境压力, $p_0=600$ kPa;扇区周向两侧采用周期性边界条件,止推壁面和轴承座套壁面均设为绝热边界。

采用 ANSYS Fluent 的耦合稳态隐式求解器,动量方程中的压力项离散采用 PRESTO 格式,扩散项采用二阶迎风格式;压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法;湍流模型选取为 SST $k-\omega$ 二方程湍流模型。迭代解的收敛标准选取为各项残差精度均小于 10^{-5} 。

采用ICEM软件生成结构化计算网格,在气膜间隙及箔片冷却通道进行网格加密,在固体壁面处划分了附面层网格,箔片间狭缝通道内第一层网格布置在距壁面 0.01mm 的位置;最小气膜间隙第一层网格布置在距壁面 0.7μm处。图 5(a)为计算域整体、止推顶箔和中箔计算网格划分图。为了保证计算网格的无关性,预先进行了多套网格的对比分析,图 5(b)为特定工况($\omega=1.2\times10^5$ r/min, $m_g=25$ kg/h)下的转盘表面沿径向压力分布,图中无量纲径向距离采用止推顶箔顶侧的平箔-波箔片组件径向长度 L作为参考长度,定义r/L=1为平箔-波箔片组件顶端径向位置,r/L=0为平箔-波箔片组件底端径向位置。可见,当计算网格数从220万增加至 480 万时,转盘表面沿径向压力分布几乎完全一致,表明计算结果达成网格无关性。最终本文数值模拟中选取的网格数目为 300 万左右。

为验证计算方法,以 Heshmat 等 $^{[6]}$ 的 箱片型气体 动压止推轴承模型作为验证算例进行建模和数值计算,取文中表面刚性工况的止推力结果进行对比分析。文献参数均以无量纲形式给出,验证时取转速 $\omega=1.96\times10^4$ r/min,最小气膜厚度 $h_{\min}=0.02$ mm,最大气膜厚度 $h_{\max}=0.04$ mm,外径 $R_{\text{out}}=24$ mm。 周向角 $\beta_p=45^\circ$,内径外径之比 $R_{\text{in}}/R_{\text{out}}=0.5$,环境压力 $p_0=101$ k Pa。 定义 楔形截面倾角与箱片扇形瓦张角的比值 (β/β_0) 为节



Whole computational region



Top foil



Middle foil

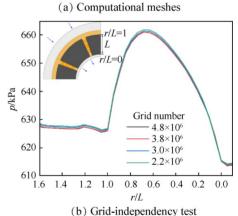


Fig. 5 Computational meshes and independence test

距比,无量纲止推力定义为

$$\bar{F} = F/(p_0 R_{\text{out}}^2) \tag{3}$$

图 6 为不同节距比下无量纲止推力分布情况。 由图可见,数值计算结果与文献结果非常吻合,验证 结果表明本文数值计算方法是可信的。

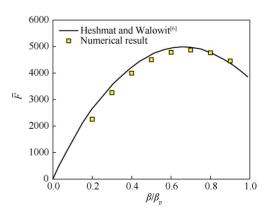


Fig. 6 Validation of dimensionless static thrust load

3 计算结果与分析

3.1 流动特征

本节以转速 ω =1.0×10 $^{\circ}$ r/min,径向人口质量流量 $m_{\rm g}$ =25kg/h为例,对比分析气膜间隙通道出口封严和 无封严情况下的流场特征。

图7显示了本文计算工况下的气膜层厚度分布, 平箔-波箔片组件导致沿圆周方向的气膜厚度变化 而形成楔形间隙。当转盘高速旋转时,转盘壁面诱 导的剪切流在止推顶箔和转盘之间的周向变截面楔 形气膜层中,形成显著的周向压力梯度,如图8所示, 在气流趋近最小气膜厚度周向位置时,楔形间隙通 道的流动动压导致气体被急剧压缩而造成局部压力 升高,在气膜层最小间隙下游的台阶突扩通道(即相 邻平箔-波箔片组件间隙)气体膨胀导致压力下降; 同时在径向上,由于不同半径处的切向速度差异也 形成显著的径向压力梯度。对比气膜间隙出口完全 封严和无封严两种情形,可以看出,气膜间隙出口方 式对气膜层内的最高压力的影响非常微弱,表明在 极小的气膜层中,高速旋转剪切诱导的周向流动占 主导机制:由于气膜间隙出口无封严方式下,部分径 向入流冷却气体可以在气膜间隙通道中形成贯流, 使得气膜间隙内的动压润滑气体泄漏,因此相对于 气膜间隙出口完全封严方式,气膜层内的最低压力 有微弱的下降,低压区范围有所拓宽。由此可见,气 膜间隙通道出口封严方式对压力分布具有一定的影 响,进而会影响气体动压轴承的止推力。

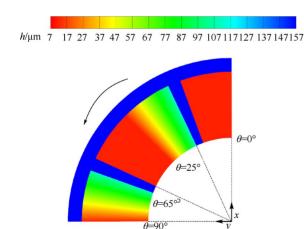


Fig. 7 Distribution of film-layer thickness

图 9 为气膜间隙出口完全封严和无封严两种情形下,在邻近转盘和箔片表面的气膜层内两个截面上的局部流动迹线分布图。在紧邻转盘侧的截面上,流线分布体现出强烈的周向运动主导特征,即气

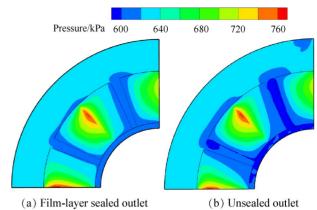
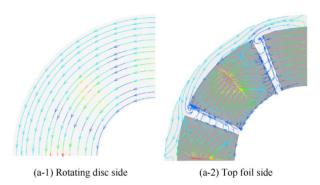
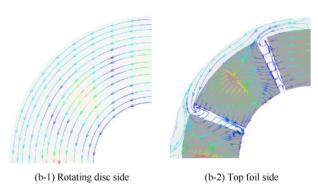


Fig. 8 Pressure contours on top-foil surface



(a) Film-layer sealed outlet



(b) Unsealed outlet

Fig. 9 Local flow trajectories inside film layer

流在旋转盘面强剪切驱动下随转子做类似于刚体的旋转运动,如图 9(a-1)和图 9(b-1)所示,径向入流冷却空气很难从紧邻转盘侧的入口进入气膜间隙;但在邻近箔片侧的截面上,气流流动轨迹与转盘侧相比发生显著变化,受到压力梯度驱使,在平箔-波箔片组件顶端和底端的径向位置处,出现复杂的局部端吸或端泄效应,如图 9(a-2)和图 9(b-2)所示,就单个平箔-波箔片组件单元而言,在其最小气膜间隙对应的周向位置上,此处局部压力最大,迫使气膜层气体向上游以及下游(相对转盘旋转方向)流动,形成局部流动的分界。沿上游方向,受逆向的高压力梯度影响,该位置气流由箔片顶端径向端泄;沿下游方

向,该位置气流在顺压力梯度作用下进入相邻平箔-波箔片组件之间的间隙通道,与端吸气流形成掺混。对比图 9(a-2)和图 9(b-2),在气膜间隙出口无封严情形下,进入相邻平箔-波箔片组件间隙通道的气流可以形成径向通流,而气膜间隙出口完全封严情形下,进入相邻平箔-波箔片组件间隙通道的气流则被迫从箔片顶端形成局部端泄。

图 10 显示了气膜间隙出口完全封严和无封严两 种情形下, 气膜层间隙通道在平箔-波箔片组件顶端 和底端两个径向位置环面上的径向速度分布云图, 可以更加直观地看出复杂的局部端吸或端泄效应。 在平箔-波箔片组件顶端环面上(r/L=1),楔形气膜层 最小间隙位置附近出现显著的端泄(径向速度大于 零的局部区域),外部流体主要通过相邻波箔片之间 的间隙对气膜层进行补充(径向速度小于零的局部 区域);相对于气膜间隙出口完全封严情形,当气膜 间隙出口无封严时,通过相邻波箔片间的间隙径向 入流速度和区域均有所增大。在平箔-波箔片组件 底端环面上(r/L=0),同样地,对应楔形气膜层最小间 隙位置附近也出现显著的端泄(径向速度小于零的 局部区域),但在两种气膜层间隙出口方式下,对应 于相邻波箔片间的间隙流动则差异十分明显。当气 膜间隙出口完全封严时,如图 10(a)所示,相邻波箔 片间的间隙出口以端吸作用为主导,即外部气流被 卷吸进气膜层进行质量补充;而当气膜间隙出口无 封严时,如图 10(b)所示,相邻波箔片间的间隙出口 区域则为径向速度小于零的气流所占据,展示了径 向入流在气膜层间隙通道中的贯流特征。

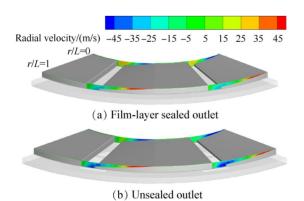


Fig. 10 Radial velocity contours at film-layer circular sections

由于箔片的周向位移很小,因此在气膜层中周向速度存在极大的轴向梯度,引入流体动能的黏性耗散项(Φ)来评估高速度梯度下耗散效应产生的影

响,其定义为

$$\Phi = \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2$$
 (4)

图 11 以自然对数方式(lnΦ)显示了黏性耗散项在止推顶箔和转盘表面的分布。径向大速度梯度造成了较高的黏性耗散热,因此在顶箔表面最小气膜厚度区域的黏性耗散强度要明显高于其他区域。在转盘表面,由于高速旋转造成的强烈剪切作用,在进气端附近也有强烈的黏性耗散效应。同时也可以看出,气膜间隙出口封严方式对气膜层内黏性耗散效应的影响非常微弱。

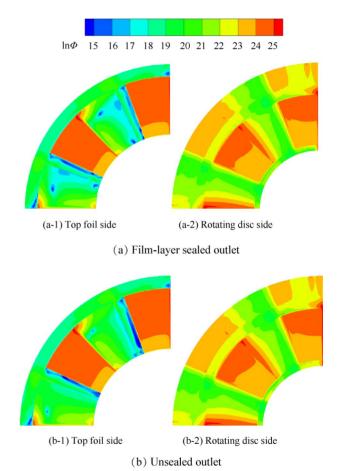


Fig. 11 Viscous dissipation term contours inside film layer

图 12 显示了箔片通道内,位于顶箔-中箔、中箔-底箔间 X-Y截面上的二维流线图,图 13 显示了两种出流封严方式下的典型周向截面。可见,在径向人流进口段,受旋转盘影响使得气流产生周向的牵引流动,以一个较大的倾斜角度流入箔片通道中。由于顶箔-中箔间的径向人流截面更贴近旋转盘,其周向牵引流动更为显著。同时止推中箔在周向上的结构特征导致顶箔-中箔、中箔-底箔间的夹层流道截面变化,两层间的气流在止推中箔的中空位置相互串通。

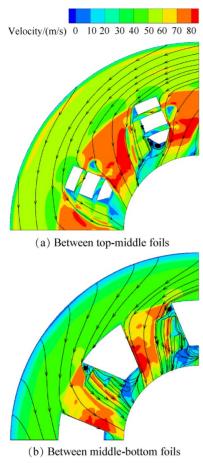


Fig. 12 Velocity distribution on X-Y sections

图 13 显示了两种出流封严方式下的典型周向截 面上(见图2)的二维流线和温度分布云图。为清晰 地显示微小通道内的细节特征,此图将 Z-方向的尺 寸进行了局部放大处理。可见,箔片气体动压轴承 中的流动非常复杂,在径向入流进口、气膜层和箔片 层内部、以及箔片底端出口等位置处出现复杂的涡 系结构。在最小气膜厚度对应的周向位置上(θ = 45°),黏性耗散强度最大,导致气膜层及止推顶箔的 局部温度最高。相比于气膜间隙出口完全封严的情 形,在气膜间隙出口无封严时,由于径向入流的冷却 空气可以部分地从气膜层中直接形成径向贯流,藉 此携带出黏性耗散热,因此气膜层及止推顶箔的局 部温度得到一定的降低;同时,由于径向入流在气膜 层和箔片层通道形成分流,流经箔片层通道的冷却 空气流量减少,因此在箔片层通道中的涡结构也有 所缩减,这一特征从 θ =22.5°截面上的流动对比中得 以清晰的展示。

图 14显示了两种不同的出口方式下,转盘、止推 顶箔和止推中箔表面温度分布。无论在转盘表面还 是在止推顶箔表面,由于最小气膜间隙(θ=45°)处的 黏性耗散效应最为剧烈,使得该位置成为流场的最

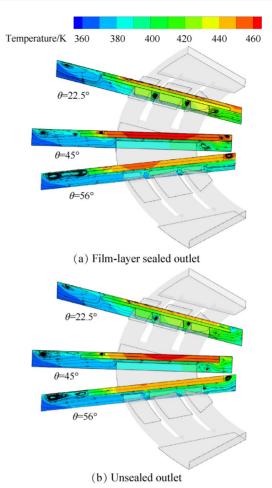


Fig. 13 Streamline and temperature contour on radial sections

高温度区域,在相邻平箔-波箔片组件的周向间隙处,出现一个较低温度区,显然这是该处低压区将端部的低温气流卷吸进入所致;而在止推中箔表面,最高温度区域周向位置相对于止推顶箔发生了偏移,此处为止推中箔与止推顶箔直接接触的区域。对比两种出口方式,气膜间隙出口封严方式对转盘和止推顶箔表面温度分布的影响较为显著,对止推中箔表面温度分布无明显影响。这是由于气膜间隙出口封严导致径向入流冷却空气进入气膜层间隙的流量受到限制,气膜层温度的改变对转盘和止推顶箔表面的温度分布势必造成较大的影响,但是当径向入流质量流量不变时,出口封严迫使径向入流只能通过箔片侧通道,使得箔片通道中对流换热能力增强。

3.2 转速的影响

本节在固定径向入流质量流量为 m_g =25kg/h的条件下,分析转盘转速对箔片气体动压止推轴承气动和热特性的影响。

图 15 为气膜间隙出口完全封严情形下,低转速 $(\omega=5\times10^4 \mathrm{r/min})$ 和高转速 $(\omega=1.2\times10^5 \mathrm{r/min})$ 时转盘表

面压力分布云图。在高转速下,气膜层间隙通道中的剪切环流动压缩效果更为强烈,气膜层最小间隙两侧的高压区拓展,且峰值高压值增大。

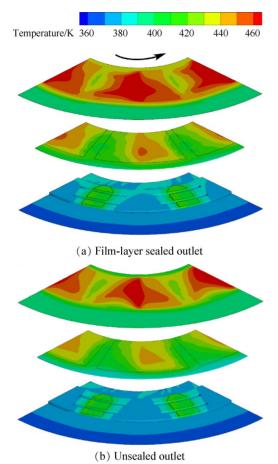


Fig. 14 Temperature contours on rotating disc and foil surfaces

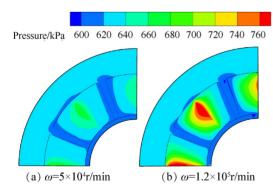


Fig. 15 Pressure contours on rotating disc surface under different rotational speed

基于转盘表面的压力分布,可通过积分得到静态轴向止推力,如下式所示

$$F = \int_{0}^{360} \int_{r_{1}}^{r_{2}} (p - p_{0}) d\theta dr$$
 (5)

图 16 对比了不同出口方式下,轴向止推力(F)和 径向入流进出口压降($\Delta p = p_{in} - p_{0}$)随转速的变化规律。

由图 16(a)可见,随着转速的升高,气体动压轴承的止推力有明显提升,相对于气膜间隙完全封严的情形,无封严出口所能提供的静态轴向止推力有一定的下降,在转速为5×10⁴r/min和1.2×10⁵r/min时,分别降低了32.5%和10.7%,随着转速增大,两种出流方式的止推力差异减小。由图 16(b)可见,随着转速的增加,径向入流的压降呈现出近似线性的增大趋势,表明旋转诱导的周向流动对径向通流流动存在一定影响。与气膜间隙无封严出口情形相比,气膜间隙出口完全封严时的径向入流进出口压降有大约10%~15%的增加,表明为维系相同的径向通流质量流量,在气膜间隙出口封严时需要提高进气的供气压力。可以推论,在相同的进气压力下,气膜间隙出口完全封严时的径向入流流通能力将受到削弱。

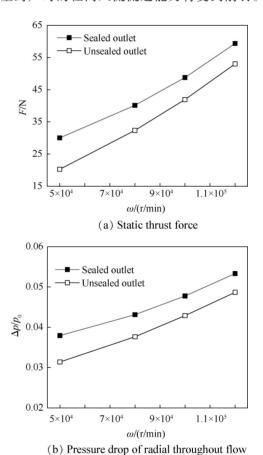


Fig. 16 Influence of rotational speed on static thrust load and pressure drop of radial throughout flow

图 17 为不同转速下,转盘表面 θ=45°局部温度和 周向平均温度沿径向分布。随着转速增大,气膜层 间隙中的黏性耗散效应增强,温度显著升高。在相 同转速下,气膜间隙通道出口完全封严时的沿程温 度要高于出口无封严时的情形,这种差异在低转速 下基本可以忽略,转盘表面平均温度差值在 5K 以内; 但在高转速下则较为明显,转盘表面平均温度差值可以达到10K以上,尤其在径向入流出口附近。在高转速情况下,由于气膜间隙内的黏性耗散热效应强烈,冷却气流直接进入气膜间隙通道可以利用对流方式迁移热量,如果没有冷却气流进入气膜层间隙通道,则黏性耗散热需通过顶箔的导热传递至箔片夹层、再由径向入流冷却空气迁移,因此径向入流在气膜层和箔片夹层中的流量分配对冷却效果具有重要的影响。

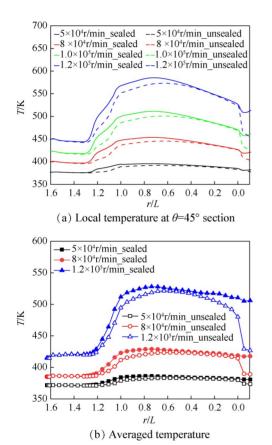


Fig. 17 Comparison of temperature distributions on rotating discs along radial direction

3.3 径向入流质量流量的影响

本节在固定转速 ω =1.0×10 $^{\circ}$ r/min条件下,分析径向人流冷却质量流量对箔片气体动压止推轴承气动和热特性的影响。

图 18 为气膜间隙通道出口无封严时,不同径向人流质量流量下转盘表面压力分布云图。随着径向人流质量流量的增加,在固定的出口背压下,需要提高供气压力以满足流量需求,高压进气填充于气膜间隙,提高了转盘表面压力。

图 19 对比了不同出口方式下, 径向入流进出口压降和轴向止推力随径向入流质量流量的变化规

律。由图 19(a)可见,径向入流进出口压降随着质量流量的增加呈现单调增大的变化趋势。在小的径向入流质量流量下,两种出口方式的进出口压降几乎相同,随着径向入流质量流量提高,压降差距才逐渐体现,完全封严时的压降相较无封严出口在质量流量为 10kg/h 和 35kg/h 时约有 0.5%~15% 的增幅。得益于进口压力的增加,轴承静态止推力随着径向入流质量流量的增加而增加。在小的径向入流质量流量(m_g=10kg/h)下,两种出口方案的静载荷差距仅有 0.8%。随着径向入流流量增大,气膜间隙出口封严

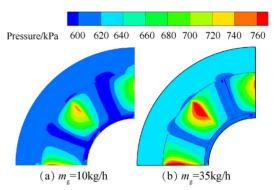
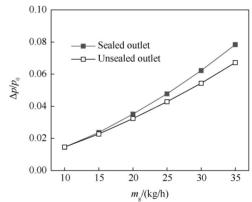


Fig. 18 Pressure contours on rotating disc surface under different radial inflow mass-flow rate



(a) Pressure drop of radial throughout flow

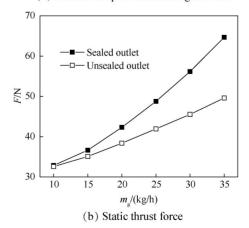
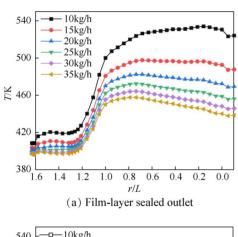


Fig. 19 Influence of radial inflow mass-flow rate on static thrust load and pressure drop of radial throughout flow

方式对止推能力的影响逐渐显现,尤其在大的径向 入流质量流量下,完全封严方式的止推能力明显强 于无封严方式,在质量流量为35kg/h时止推力差距达 到23.3%。

图 20 为不同径向入流质量流量下,转盘表面周向平均温度沿径向的分布。随着径向入流质量流量增大,转盘表面温度值呈现不断降低的变化趋势。在较小的径向入流质量流量范围内,增加径向入流质量流量对于降低转盘表面温度的作用更为显著。当径向入流质量流量从 m_s =10kg/h增加至 m_s =15kg/h时,转盘表面周向平均温度的峰值可以有 40K 左右的降幅;当径向入流质量流量从 m_s =30kg/h增加至 m_s =35kg/h时,转盘表面周向平均温度的峰值仅有大约8K 左右的降低,可见在较大的径向入流质量流量范围内,增加质量流量对于降低转盘表面温度的作用趋于微弱。故径向入流不仅可以起到有效的冷却作用,而且对轴承的止推力也起到了较好的增强作用。



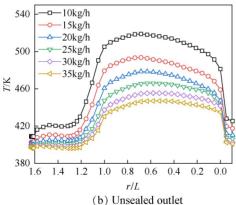


Fig. 20 Influence of massflow rate of axial throughflow on temperature distributions on shaft surface

4 结 论

对带径向入流的高转速、微小间隙弹性箔片气体动压止推轴承,在轴承运行状态稳定、弹性变形恒

定的主要假设前提下进行了三维流-固耦合数值模拟,主要研究结论如下:

- (1)在转盘和止推顶箔之间的气膜层间隙中,旋转盘面强剪切驱动的周向流动占主导机制;止推顶箔表面上的楔形状平箔-波箔片组件形成动压效应,导致箔片段气膜层边缘有明显的局部气流端吸和端泄现象。
- (2)气膜间隙出口方式对气膜层内的最高压力影响较为微弱,但对于压力分布具有明显的影响。相对于气膜间隙出口完全封严情形,无封严出口可以使得径向入流在气膜层通道形成贯流,改善转盘和止推顶箔冷却效果、减小径向通流压降,但同时也带来止推力下降的负面影响。
- (3)相对于气膜间隙完全封严的情形,无封严出口所提供的轴向止推力在转速为 5×10⁴r/min 和 1.2×10⁵r/min 时分别降低了 32.5% 和 10.7%,径向入流进出口压降有大约 10%~15% 的降低。气膜间隙出口封严方式对转盘和止推顶箔的冷却效果在高转速下较为明显。
- (4)增加径向入流质量流量可以有效地增强冷却效果和止推力。在较小的径向入流质量流量范围内,增加质量流量对于降低转盘表面温度的作用更为显著。气膜间隙出口封严方式对径向入流进出口压降和止推力的影响在大的径向入流质量流量下较为明显,封严时的轴向止推力相较无封严出口在质量流量为10kg/h和35kg/h时分别提高了0.8%和23.3%;径向入流压降则约有0.5%~15%的增幅。

致 谢:感谢航空基金、江苏省自然科学基金青年基金及中国博士后基金站前特别资助的资助。

参考文献

- [1] Heshmat H. Advancements in the Performance of Aerodynamic Foil Journal Bearings: High Speed and Load Capacity Discussion [J]. ASME Journal of Tribology, 1994, 116: 287-295.
- [2] 张文明, 孟 光, 陈 迪. 微转子系统径向气体轴承特性[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 25-33.
- [3] Wang G P, Cheng S, Hao H N. Recent Progress on the Structural Styles of Journal Foil Gas Bearings [C]. Singapore: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.
- [4] Lee D H, Kim D J. Design and Performance Prediction of Hybrid Air Foil Thrust Bearings [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(4).
- [5] Zheng Y, Lai T, Chen S, et al. Static Characteristics of Six Pads Multilayer Protuberant Foil Thrust Bearings [J].

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231 (2): 158-164.
- [6] Heshmat H, Walowit JA, Pinkus O. Analysis of Gas Lubricated Compliant Thrust Bearings[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1983, 105(4): 638-646.
- [7] Salehi M, Heshmat H, Walton J F. Advancements in the Structural Stiffness and Damping of a Large Compliant Foil Journal Bearing: An Experimental Study[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 129: 154-161.
- [8] Jahannir S, Heshmat H, Heshmat C. Assessment of Tribological Coatings for Foil Bearing Applications [J]. Tribology Transactions, 2009, 52: 231-242.
- [9] 方 华,常海萍,张镜洋,等.润滑气体及箔片材料对气体动压轴承动特性影响分析[J].推进技术,2014,35(8):1116-1122.(FANG Hua, CHANG Haiping, ZHANG Jing-yang, et al. Analysis of Lubrication Gas and Elastic Foil for Gas Foil Bearing Dynamic Characteristics[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(8):1116-1122.)
- [10] 胡嘉麟, 高金海, 黄恩亮, 等. 滑移边界对空气轴承性能的影响研究[J]. 推进技术, 2017, 38(6): 1359-1369. (HU Jia-lin, GAO Jin-hai, HUANG En-liang, et al. Effects of Slip Boundary on Air Bearing Performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38 (6): 1359-1369.)
- [11] Zhou Y, Shao L T, Zhang C, et al. Numerical and Experimental Investigation on Dynamic Performance of Bump Foil Journal Bearing Based on Journal Orbit [J].

 Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 586-600.
- [12] Peng Z C, Khonsari M M. Hydrodynamic Analysis of Compliant Foil Bearings with Compressible Air Flow [J]. ASME Journal of Tribology, 2004, 126(3): 542-546.
- [13] Peng Z C, Khonsari M M. A Thermohydrodynamic Analysis of Foil Journal Bearings[J]. ASME Journal of Tribology, 2006, 128(3): 534-541.
- [14] Sim K, Kim D. Thermohydrodynamic Analysis of Compliant Flexure Pivot Tilting Pad Gas Bearings [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(3).
- [15] Aksoy S, Aksit M F. A Fully Coupled 3D Thermo-Elastohydrodynamics Model for a Bump-Type Compliant Foil Journal Bearing [J]. Tribology International, 2015, 82: 110-122.
- [16] Kim T H, Andres L S. Thermohydrodynamic Model Predictions and Performance Measurements of Bump-Type Foil Bearing for Oil-Free Turboshaft Engines in Rotorcraft Propulsion Systems [J]. Journal of Tribology,

- 2010, 132(1).
- [17] Ryu K. Prediction of Axial and Circumferential Flow Conditions in a High Temperature Foil Bearing with Axial Cooling Flow [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(9).
- [18] Ryu K, Andres L S. Effect of Cooling Flow on the Operation of a Hot Rotor-Gas Foil Bearing System[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134 (10).
- [19] Shrestha S K, Kim D J, Kim C. Experimental Feasibility Study of Radial Injection Cooling of Three-Pad Air Foil Bearings[J]. ASME Journal of Tribology, 2013, 135(4).
- [20] Lee D H, Lim H S, Choi B S, et al. Thermal Behavior of Radial Foil Bearings Supporting on an Oil-Free Gas Turbine: Design of the Cooling Flow Passage and Modeling of the Thermal System [J]. Journal of Engineering Gas Turbines and Power, 2017, 139(6).
- [21] Sim K, Lee Y B, Song J W, et al. Effect of Cooling Flow on Thermal Performance of a Gas Foil Bearing Floating on a Hot Rotor [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(5): 1939-1954.
- [22] Zhang K, Zhao X Y, Feng K, et al. Thermohydrodynamic Analysis and Thermal Management of Hybrid Bump-Metal Mesh Foil Bearings: Experimental Tests and Theoretical Predictions [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 127: 91-104.
- [23] Gad A M, Kaneko S. Fluid Flow and Thermal Features of Gas Foil Thrust Bearings at Moderate Operating Temperatures [C]. *Milano: Proceedings of the 9th International Conference on Rotor Dynamics*, 2015: 1223-1233.
- [24] Zhang Y, Chen G D, Wang L. Thermoelastohydrodynamical Analysis of Misaligned Bearings with Texture on Journal Surface under High-Speed and Heavy-Load Conditions [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1331-1342.
- [25] Mahner M, Bauer M, Schweizer B. Numerical Analyzes and Experimental Investigations on the Fully-Coupled Thermo-Elasto-Gasdynamic Behavior of Air Foil Journal Bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107221.
- [26] 张镜洋, 赵晓荣, 常海萍. 边界滑移对波箔型动压气体轴承静特性的影响[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 388-395. (ZHANG Jing-yang, ZHAO Xiao-rong, CHANG Hai-ping. Effects of Sliding Boundary on Static Characteristics of Aerodynamic Compliant Foil Bearing [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(2): 388-395.)
- [27] 周健斌,孟 光,张文明. 微机电系统径向气体轴承特性研究[J]. 振动与冲击,2007,26(9):30-33.

(编辑:梅 瑛)