

超导可倾瓦磁液复合轴承的动力学特性分析

闫岗¹, 金英泽¹, 陈晖², 苗旭升², 金路², 许吉敏³, 袁小阳¹

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安航天动力研究所
涡轮泵研究室, 710100, 西安; 3. 合肥工业大学机械工程学院摩擦学研究所, 230009, 合肥)

摘要: 针对我国新一代液体火箭涡轮泵高速、可重复使用的功能需求与现役滚动轴承直径与转速的乘积(DN 值)难以提高之间的矛盾,提出了一种新型超导可倾瓦磁液复合轴承,能够实现磁液优势互补、启停磨损性能和高速振动稳定性综合较优,从而成倍地提高涡轮泵转速并延长其使用寿命。通过涡轮泵系统自带的低温介质,实现了超导磁力与动压液膜力的复合;基于磁通冻结镜像模型和雷诺方程,建立了考虑超导体场冷高度和低黏介质流态的磁液复合分析模型;对于磁场与流场之间的热效应、瓦摆效应和介磁效应的耦合关系,提出了解耦的分析方法;研究了不同设计参数对复合轴承轴心轨迹和动态最小膜厚的影响,揭示了复合轴承的非线性动力学规律。研究结果表明:最佳支点系数在 62%~66%之间,可以显著改善轴承的服役性能;在 0.04%~0.05%之间存在一个会使最小膜厚出现极小值的间隙比;增大长径比对轴承性能的改善最为明显,增大瓦包角对轴承性能的改善效果微弱;载荷作用在瓦块之间时,复合轴承具有更好的动态承载能力。可为抑制轴颈振动和提高复合轴承承载能力提供一些设计指导,对设计高可靠性火箭涡轮泵的轴系结构也具有一定的参考价值。

关键词: 轴心轨迹;动态最小膜厚;磁液复合轴承

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202011008 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0065-09



OSID 码

Analysis on the Dynamic Characteristics of Superconducting Tilting Pad Magnetic Fluid Composite Bearings

YAN Gang¹, JIN Yingze¹, CHEN Hui², MIAO Xusheng², JIN Lu²,
XU Jimin³, YUAN Xiaoyang¹

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Turbopump Research Room, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China; 3. Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the contradiction between the high-speed and reusable functional requirements of China's new-generation liquid rocket turbo pumps and the difficulty of increasing the DN value of active rolling bearings, a new type of superconducting tilting-pad magnetic-fluid composite bearing is proposed, which can achieve complementary advantages of magnetic fluid. The start-stop wear performance and high-speed vibration stability are comprehensive, which doubles the speed of the turbo pump and prolongs its service life. The combination of superconducting magnetic force and dynamic pressure liquid film force is realized through the low temperature medium that comes with the turbo pump system. Based on the magnetic flux

freezing-mirror model and Reynolds equation, a magnetic-hydraulic composite analysis model considering the superconductor-field cold height and the flow state of low-viscosity media is established. Aiming at the coupling relationship of the thermal effect, the pad swing effect and the dielectric magnetic effect between magnetic field and flow field, a decoupling analysis method is proposed. The effects of different design parameters on the axis trajectory and the dynamic minimum film thickness of the composite bearing are studied, and the nonlinear dynamics of the composite bearing is revealed. The results indicate that there is an optimal pivot offset between 62% and 66%, which can significantly improve the service performance of the bearing and that there is an inflection point between the clearance ratio of 0.04% and 0.05%, which will cause a minimum value of the minimum film thickness. Increasing the length-to-diameter ratio is the most obvious improvement in bearing performance, and the effect of increasing the pad arc angle on the bearing performance is weak. When the load acts between the pads, composite bearings have better dynamic performance and load capacity. The research results can provide some design guidance for suppressing journal vibration and improving the bearing capacity of composite bearings. It also has reference value for designing the shafting structure of high-reliability rocket turbo pumps.

Keywords: journal center orbit; dynamic minimum film thickness; magnetic-fluid composite bearing

液体运载火箭是进行太空活动的重要工具,是我国布局卫星网络、建设空间站等必须重点研究的关键装备^[1],因此发展新一代运载火箭具有重要的战略意义。目前液体运载火箭均使用滚动轴承作为轴系支撑部件,而滚动轴承的转速与寿命相互制约且其直径与转速的乘积(DN值)难以提高,对于发展新一代大型、重载、可重复使用的运载火箭是瓶颈^[2]。各国都在寻找可行的轴承替代方案,尝试将液膜轴承和电磁轴承引入到涡轮泵轴系中^[3-5],但这些替代方案各有其局限性,电磁轴承难以保证低温环境下的工作可靠性,流体轴承中的静压部分会干扰燃料输送系统。

1911年Onnes首次发现了超导现象,但初期发现的超导材料临界转变温度 T_c 极低,应用受限。直到1987年Zhao等发现了 T_c 高达93 K的YBaCuO高温超导材料^[6],超导体的临界转变温度突破了麦卡米兰极限^[7]进入了液氮温区(77 K),应用成本大幅下降,相关应用研究开始增加,高温超导磁轴承(SMB)就是这类超导材料工程应用的典型代表。SMB在液氢液氧涡轮泵等具有天然低温环境的设备中展现出了良好的应用前景。Zhang等设计了一种采用推力型SMB的小型反作用轮,用于航天器姿态控制,实验结果表明即使考虑到冷却系统的需求,新型超导反作用轮的功耗也比使用机械球轴承的现役反作用轮小得多^[8]。工作于太空中的

姿态控制发动机和轨道控制发动机均具有天然低温环境,可省去制冷系统。采用SMB支承的转子系统可实现无机械摩擦高速旋转,利用转子储存的动能和角动量可以实现航天器的能量储存与姿态控制一体化,这更突出了SMB应用于航空航天领域的优越性。因此,各国都在尝试将SMB引入到火箭发动机等航天设备中。美国NASA研究人员对SMB应用于液体火箭发动机的可行性进行了研究,指出其动特性较差,难以很好地满足服役要求^[9]。2006年德国布伦瑞克大学、耐克森公司和西门子公司合作研制了应用于4 MVA超导发电机的径向型SMB,第一次实现了SMB的工业级应用,但其悬浮刚度远小于同尺寸的流体轴承^[10]。

有学者认为SMB必须向复合型支承发展,引入其他动力学性能良好的力场才能加速其应用进程。陈润霖等提出了一种用于新一代火箭发动机涡轮泵轴系轴向支承的静压推力型超导磁液复合轴承,其液体静压源于涡轮泵径向密封前后压差,复合轴承可以保证转子系统在启停阶段无机械摩擦,在高速运行阶段稳定工作^[11]。许吉敏等给出了一种超导磁液复合轴承在液体火箭发动机中的应用方案,采用径向推力联合轴承取代存在机械摩擦的现役滚动轴承,该轴系轴向采用一个双向推力超导磁液复合轴承,径向采用两个超导可倾瓦磁液复合轴承^[12-13]。这种超导可倾瓦磁液复合轴承的特殊之处

在于其润滑介质为液氢液氧等低黏流体,其承载方式为超导磁力与动压流体力复合承载。相关研究并不完善,在低黏润滑介质方面的研究多集中在极端工况下水润滑轴承的承载性能上^[14];在磁液复合方面的研究主要集中在磁液复合轴承的静动特性上^[15-16]。关于低温低黏润滑介质下超导磁液复合轴承动力学特性的研究鲜有报道,鉴于超导可倾瓦轴承流体动力承载和超导磁力减载的复合影响,有必要对其动力学特性和承载能力进行研究。

本文研究了不同设计参数下超导可倾瓦磁液复合轴承的动力学特性,揭示了预负荷系数、支点系数、长径比、间隙比、瓦包角和负载方向对复合轴承轴心轨迹和动态最小膜厚的影响规律,为超导可倾瓦轴承的结构设计提供了参考。

1 基本方程

1.1 超导计算模型

本文提出的超导可倾瓦磁液复合轴承结构如图 1 所示,该复合轴承由 4 块可倾轴瓦组成,每块轴瓦中安装一块圆柱体超导块,轴颈上安装永磁体环以产生磁场。

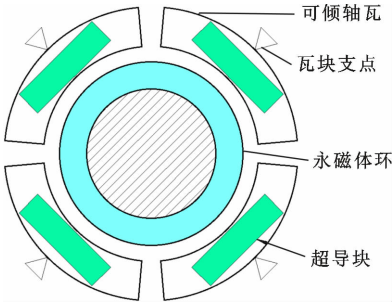


图 1 超导可倾瓦轴承结构示意图

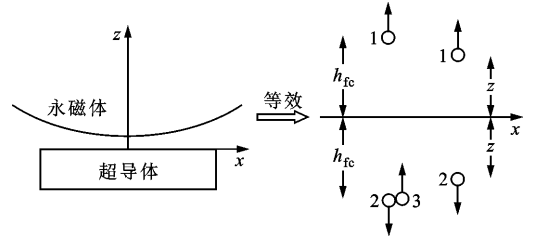
径向型超导磁液复合轴承的冷却方式只能为场冷,因此本文采用考虑了初始冷却条件对悬浮性能影响的磁通冻结-镜像模型^[17]计算超导磁力,在计算时做如下假设:①超导体所对的永磁环弧段看作一个磁偶极子,超导体看作半无限结构;②轴颈与超导体相对运动过程中超导体内部磁场不变;③外部磁场的磁感线垂直穿过超导体;④忽略轴颈相对于超导块运动的切向分量。基于上述假设,计算时的简化模型如图 2 所示。

两个磁偶极子之间的力为

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{m}$ 为一个磁偶极子的磁矩; $\mathbf{B}$ 为另一个磁偶极子产生的磁场。

磁矩为 $\mathbf{m}$ 的磁偶极子在任意一点 $\mathbf{U}(x, z)$ 产生



1—永磁体;2—抗磁镜像;3—冻结镜像; h_{fc} —场冷高度。

图 2 磁通冻结-镜像简化模型

的磁场为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi} \left(\frac{3zx}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \hat{\mathbf{x}} + \frac{2z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \hat{\mathbf{z}} \right) \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; $\hat{\mathbf{x}}$ 为 x 方向上的单位矢量; $\hat{\mathbf{z}}$ 为 z 方向上的单位矢量。

经过磁偶极子的等效后,永磁体在 $\mathbf{U}(x, z)$ 上受到的磁悬浮力 $\mathbf{F}_z(x, z)$ 为抗磁镜像磁偶极子 2 和冻结镜像磁偶极子 3 分别作用在永磁体磁偶极子 1 上的力的矢量和。其中抗磁镜像来源于超导体表面的屏蔽电流,它与永磁体始终关于超导体边界面 x 轴对称,即抗磁镜像跟随永磁体做镜像运动。冻结镜像来源于超导体中捕获的磁通,它在超导体初始冷却高度上形成后不随永磁体位置的变化而移动。根据式(1)可得

$$\mathbf{F}_z(x, z) = \frac{3\mu_0 \mathbf{m}_1 \mathbf{m}_2}{4\pi} \left\{ \frac{x^3 - 4x(z + h_{fc})^2}{[x^2 + (z + h_{fc})^2]^{7/2}} \hat{\mathbf{x}} + \left[\frac{2}{(2z)^4} + \frac{3(z + h_{fc})x^2 - 2(z + h_{fc})^3}{[x^2 + (z + h_{fc})^2]^{7/2}} \right] \hat{\mathbf{z}} \right\} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{m}_1$ 为永磁体简化成的磁偶极子,其方向与 z 轴正方向一致; $\mathbf{m}_2$ 为抗磁镜像磁偶极子,方向与 $\mathbf{m}_1$ 相反; h_{fc} 为场冷高度。

计算时采用等效电流环的方法,将每个磁偶极子均等效为电流环,两电流环之间的轴向力为

$$F_z(I_1, I_2, z) = \frac{\mu_0 I_1 I_2 z}{[(R_1 + R_2)^2 + z^2]^{1/2}} \cdot \left[-K(k) + \frac{R_1^2 + R_2^2 + z^2}{(R_1 - R_2)^2 + z^2} E(k) \right] \quad (4)$$

式中: I_1 为半径是 R_1 的电流环中的电流强度; I_2 为半径是 R_2 的电流环中的电流强度; z 为两电流环之间的轴向距离; $K(\cdot)$ 为第 1 类完全椭圆积分; $E(\cdot)$ 为第 2 类完全椭圆积分; k 由下式给出

$$k = \frac{4R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2 + z^2} \quad (5)$$

对于永磁体-超导体磁悬浮系统,永磁体与超导体间的作用力 F_s 是由抗磁镜像与永磁体以及冻结镜像与永磁体间的作用力叠加而成,表达式如下

$$F_s(z) = F_z(I_{PM}, I_{dia}, z_{PM} + z_{dia}) +$$

$$F_z(I_{PM}, I_{fr}, z_{PM} + z_{fr}) \quad (6)$$

式中: I_{PM} 、 I_{dia} 、 I_{fr} 分别为永磁体等效电流环、抗磁镜像等效电流环、冻结镜像等效电流环中的电流强度; z_{PM} 、 z_{dia} 、 z_{fr} 分别为永磁体等效电流环、抗磁镜像等效电流环、冻结镜像等效电流环到超导体边界面 x 轴的距离。

1.2 流体控制方程

超导可倾瓦轴承的几何坐标如图3所示,在等温、不可压缩和无惯性流动的条件下,第 i 块轴瓦的紊流雷诺方程为

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{h_i^3}{k_\phi} \frac{\partial p_i}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h_i^3}{k_z} \frac{\partial p_i}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} \mu \omega \frac{\partial h_i}{\partial \phi} + \mu \frac{\partial h_i}{\partial t} \quad (7)$$

式中: R 为轴颈半径; ϕ 为周向坐标; p_i 为液膜压力; h_i 为液膜厚度; z 为轴向坐标; k_ϕ 和 k_z 为紊流系数; μ 为动力黏度; t 为时间; ω 为转速。

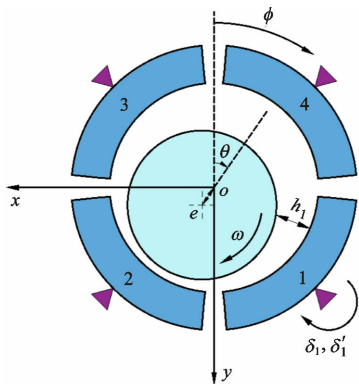


图3 超导可倾瓦轴承几何坐标示意图

膜厚 h_i 由下式给出

$$h_i = c_p - (c_p - c_b) \cos(\beta_i - \phi) + e \cos(\phi - \theta) + R \delta_i \sin(\beta_i - \phi) \quad (8)$$

式中: c_p 为瓦块径向间隙; c_b 为轴承径向间隙; β_i 为支点位置角; e 为轴颈偏心距; θ 为轴颈偏位角; δ_i 为瓦块摆角。

Ng-Pan 模型^[18]紊流系数 k_ϕ 和 k_z 由下式给出

$$\left. \begin{aligned} k_\phi &= 12 + 0.013 \, 6 Re^{0.9} \\ k_z &= 12 + 0.004 \, 3 Re^{0.96} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: Re 为局部雷诺数。

瓦块 i 在 x 和 y 方向的承载力分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{ixi} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} -p_i R \sin \phi d\phi dz \\ F_{iyi} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} -p_i R \cos \phi d\phi dz \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: L 为轴承长度; ϕ_{in} 为进液边位置角; ϕ_{out} 为出液边位置角。

采用数据库法^[19]计算可倾瓦轴承的非线性液膜力,首先以单瓦为基础离散状态变量,将预先计算好的非线性液膜力按一定顺序存储在数表文件中形成单瓦基础数据库,然后通过检索、插值、拼装组合等方式得到可倾瓦轴承在任一状态变量下的非线性液膜力和瓦块力矩。

2 磁液复合分析方法

超导可倾瓦磁液复合轴承同时通过超导磁力和动压液膜力承载,超导磁力与液膜力的耦合关系主要体现为热效应、瓦摆效应和介磁效应。

Artiles 指出液氢环境中轴承的温升非常小,液氧环境温升稍高^[20],同时考虑到液氢液氧涡轮泵的轴端温度极低,分别为 30、77 K 左右,因此本文忽略热致磁力变化。

日本泉充研究小组指出:瓦摆效应摆动幅度微弱,对超导磁力的影响可以忽略^[21]。本文忽略瓦摆效应的影响,采用各瓦块支点间隙作为对应超导块的悬浮间隙求解超导力。由于场冷高度为半径间隙,因此当支点间隙小于半径间隙时,超导块对轴颈表现为斥力,否则,表现为吸力。瓦块 1 的支点间隙 h_{f1} 由下式求得

$$h_{f1} = \left(\left(-(c_b + R) \cos \left(\alpha \zeta + \frac{\pi - 2\alpha}{4} \right) - x \right)^2 + \left((c_b + R) \sin \left(\alpha \zeta + \frac{\pi - 2\alpha}{4} \right) - y \right)^2 \right)^{1/2} - R \quad (11)$$

式中: α 为瓦包角; ζ 为支点系数; x 和 y 为轴承坐标系下的轴心坐标。其他瓦块支点间隙的解法与之相同,仅需根据瓦块支点方位变换正弦余弦及其符号。

介磁效应的影响主要体现为流场润滑介质的引入改变了磁力传导介质,而磁力传导介质的特性是通过磁导率来体现的,在计算超导磁力时,需将真空磁导率替换为相应的介质磁导率。

磁场的存在对流场几乎没有影响,因此可视超导磁力与液膜力为相互叠加的弱耦合关系,采用解耦的方法进行分析,复合轴承性能分析流程如图4所示。

复合轴承轴颈和轴瓦的运动方程可描述为

$$\left. \begin{aligned} m_j \ddot{x} &= m_j \omega^2 e_u \sin \omega t - F_{cx} + w_x \\ m_j \ddot{y} &= m_j \omega^2 e_u \cos \omega t - F_{cy} + w_y \\ J \ddot{\delta}_i &= M_i \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: m_j 为轴颈质量; e_u 为不平衡质量偏心距; $\ddot{x}$ 和 $\ddot{y}$ 分别为轴颈在轴承坐标系下 x 和 y 方向上的运动加速度; F_{cx} 和 F_{cy} 分别为复合轴承在 x 和 y 方向上

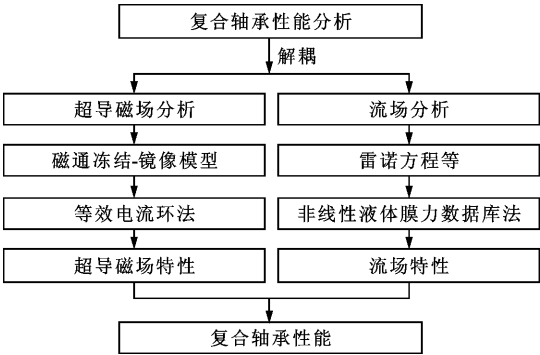


图 4 复合轴承性能分析流程图

的承载力; ω_x 和 ω_y 分别为 x 和 y 方向上的载荷; $\ddot{\delta}$ 为瓦块摆动加速度; M_i 为作用在瓦块上的力矩; J 为瓦块转动惯量。

式(12)中的 F_{cx} 、 F_{cy} 和 M_i 由下式给出

$$F_{cx} = \sum_i F_s(h_{fui}) \sin a_i + \sum_i \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} -p_i R \sin \phi d\phi dz$$
$$F_{cy} = \sum_i F_s(h_{fui}) \cos a_i + \sum_i \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} -p_i R \cos \phi d\phi dz$$
$$M_i = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{\phi_{in}}^{\phi_{out}} p_i R^2 \sin(\beta_i - \phi) d\phi dz$$

}

(13)

式中: a_i 为第 i 块瓦上的超导磁力方向与 y 轴所夹锐角。

采用欧拉法求解式(12),提取稳态响应数据以研究轴承设计参数对超导可倾瓦轴承轴心轨迹和动态最小膜厚的影响。

3 计算结果与讨论

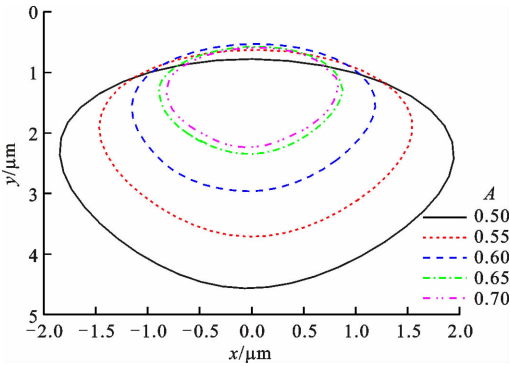
本文研究的超导可倾瓦磁液复合轴承面向火箭发动机液氧涡轮泵,动压部分的润滑介质为液氧,其密度为1 221.9 kg/m³,动力黏度为 353.24 μPa·s,磁导率为 1.256 6 μH/m。表 1 给出了计算所用的复合轴承运行及结构参数。

3.1 预负荷系数的影响

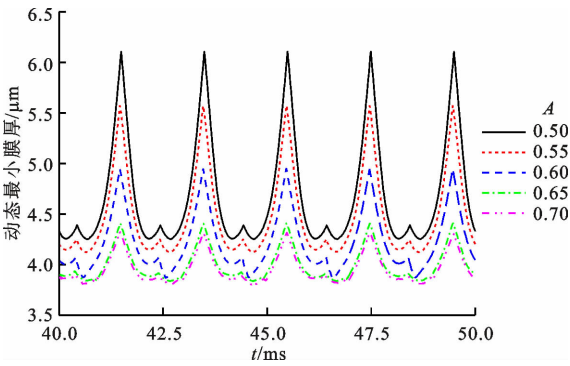
在工程应用中,为防止未承载的瓦块不断摆动,常在瓦块上施加一定的预负荷。图 5 比较了 5 种不同预负荷系数下,超导可倾瓦磁液复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚。可以看出,随着预负荷系数的增加,轴心轨迹和最小膜厚都会减小,轴心轨迹逐渐向轴承中心靠拢。预负荷系数从 0.5 增加到 0.7 的过程中,轴颈在 x 方向上的振幅从 1.94 μm 降低

表 1 复合轴承运行及结构参数

基本参数	数值
轴颈直径 D/mm	70
转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	30 000
轴颈质量 m_j/kg	34
不平衡质量偏心距 $e_u/\mu\text{m}$	50
载荷 ω/N	20 000
超导体厚度 h_s/mm	15
超导体直径 d/mm	40
间隙比 ϕ	0.05%
长径比 η	0.6
预负荷系数 A	0.5
支点系数 ξ	50%
瓦包角 $\alpha/(\text{^\circ})$	80
负荷方向角	π



(a)轴心轨迹



(b)动态最小膜厚

图 5 不同预负荷系数下的轴心轨迹和动态最小膜厚

到了 0.83 μm,降低了 57.2%; y 方向上的振幅从 1.90 μm 降低到了 0.82 μm,降低了 56.8%;最小膜厚从 4.25 μm 减小到了 3.80 μm,降低了 10.6%。轴心轨迹尺寸随预负荷系数的增加而减小的趋势逐渐放缓,最小膜厚随预负荷系数的增加而减小的速度为先增大后减小。

3.2 支点系数的影响

支点系数为 50% 表示瓦块支点位于瓦背的中心。根据计算结果, 支点系数大于 68% 时瓦块将没有平衡位置。图 6 比较了不同支点系数下复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚。可以看出, 随着支点系数的增加, 轴心轨迹的尺寸和最小膜厚逐渐减小。支点系数从 50% 增加到 66% 的过程中, 轴颈在 x 方向上的振幅从 $1.89 \mu\text{m}$ 下降到了 $1.15 \mu\text{m}$, 降低了 39.1%; y 方向上的振幅从 $1.90 \mu\text{m}$ 下降到了 $1.06 \mu\text{m}$, 降低了 44.2%; 最小膜厚从 $4.25 \mu\text{m}$ 减小到了 $2.77 \mu\text{m}$, 降低了 34.8%。支点系数从 50% 增加到 62% 时, 轨迹中心逐渐向轴承中心靠近, 但支点系数从 62% 增加到 66% 后, 轨迹中心又远离了轴承中心。

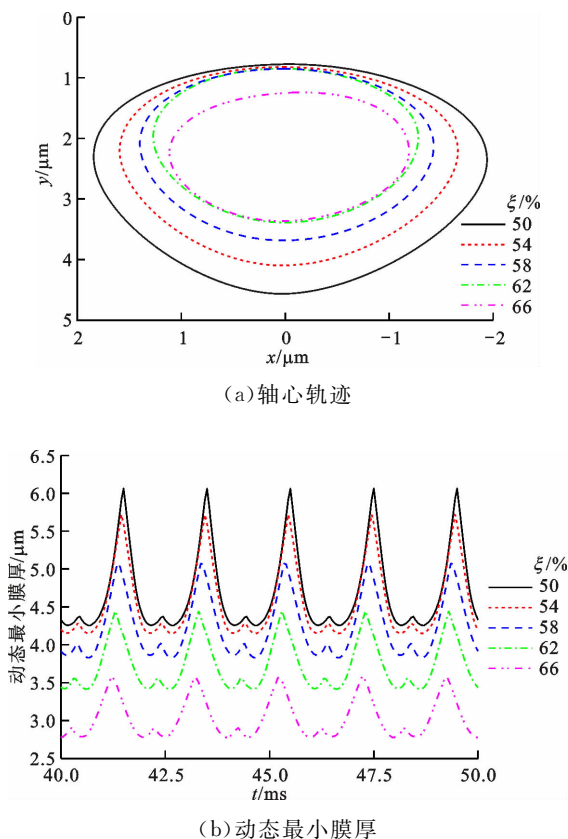


图 6 不同支点系数下的轴心轨迹和动态最小膜厚

最小膜厚随支点系数的增加而减小的趋势越来越快, 同时考虑到轨迹中心随支点系数的增加呈现先靠近后远离轴承中心的规律, 这说明存在一个最佳支点系数可以在显著减小轴颈振动并使轨迹中心尽量靠近轴承中心的同时保持适当的最小膜厚, 根据计算结果, 该最佳支点系数位于 62%~66% 之间。

3.3 长径比的影响

不同长径比下复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚如图 7 所示, 增加长径比可显著降低轴承比压,

减小轴承振动, 增大最小膜厚, 减小轴心轨迹的尺寸, 并使轨迹中心逐渐上移靠近轴承中心。具体来说, 长径比从 0.6 增加到 1.4 的过程中, 轴颈在 x 方向上的振幅从 $1.89 \mu\text{m}$ 降低到了 $0.52 \mu\text{m}$, 降低了 72.5%; y 方向上的振幅从 $1.90 \mu\text{m}$ 降低到了 $0.53 \mu\text{m}$, 降低了 72.1%; 最小膜厚从 $4.25 \mu\text{m}$ 增加到了 $6.38 \mu\text{m}$, 增大了 50.1%。

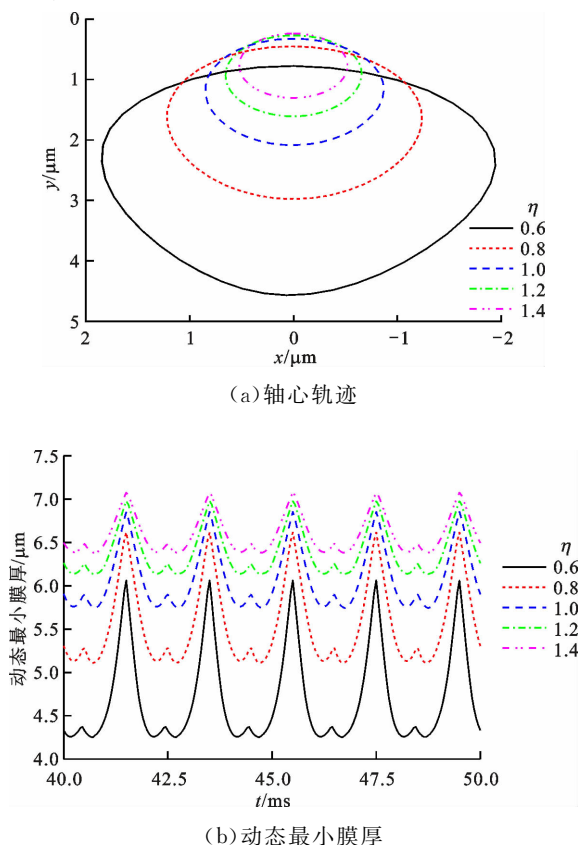


图 7 不同长径比下的轴心轨迹和动态最小膜厚

从分析结果来看, 长径比应尽量选取较大值, 但在工程应用中长径比过大会使轴承安装困难, 轴颈产生挠度造成工况严重恶化等不良后果。此外, 液体运载火箭的发射成本高达每千克上万美元, 其各部件有严格的结构尺寸限制, 且其特殊的液氢液氧润滑介质在恶劣工况下会造成爆炸事故。因此, 设计时应综合考虑各方面因素在保证工况安全和结构允许的前提下选取较大的长径比。

3.4 瓦包角的影响

本案例中瓦包角不能小于 57° , 否则瓦块中将没有足够的空间安装超导体。图 8 给出了瓦包角对复合轴承轴心轨迹和动态最小膜厚的影响, 增大瓦包角可以降低轴颈振动, 增加最小膜厚, 减小轨迹尺寸并使轨迹中心上移靠近轴承中心。瓦包角从 65° 增加到 85° 的过程中, 轴颈在 x 方向上的振幅从

2.21 μm 降低到了 1.81 μm ,降低了 18.1%; y 方向上的振幅从 2.23 μm 降低到了 1.81 μm ,降低了 18.8%;轴承最小膜厚从 3.81 μm 增加到了 4.35 μm ,增大了 14.2%。由数据分析可知,瓦包角对轴承性能的影响要小于其他结构参数。

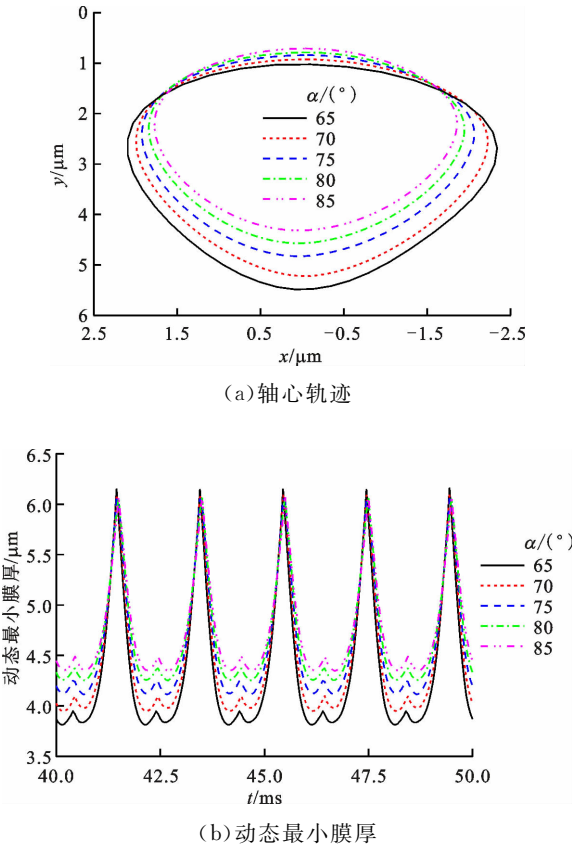


图 8 不同瓦包角下的轴心轨迹和动态最小膜厚

3.5 负载方向角的影响

图 9 比较了 5 个不同负载方向下复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚。负载方向角为 $3\pi/4$ 和 $5\pi/4$ 时,外载荷作用在瓦块上;负载方向角为 π 时,外载荷作用在瓦块之间。

由图可得,随着负载方向由瓦块上变为瓦块间,负载方向上的振幅由 3.11 μm 降低到了 1.90 μm ,

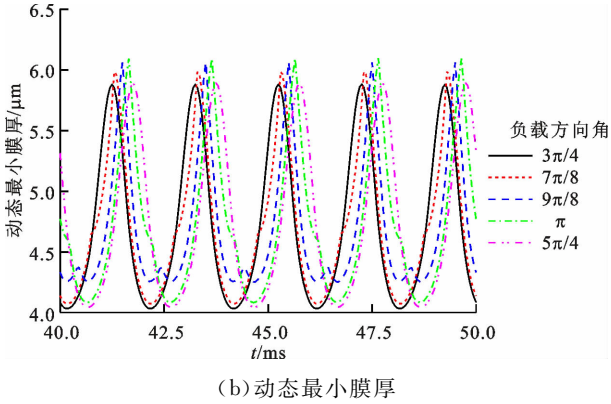
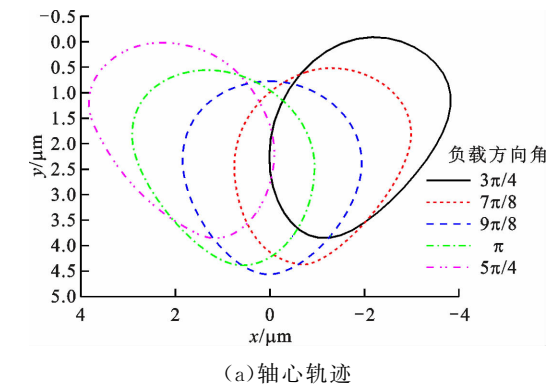


图 9 不同负载方向下的轴心轨迹和动态最小膜厚

减小了 38.9%;垂直于负载方向上的振幅由 4.27 μm 降低到了 1.89 μm ,减小了 55.7%;最小膜厚从 4.04 μm 增加到了 4.25 μm ,增大了 5.2%。可见负载方向位于瓦块之间时,复合轴承具有更好的服役性能。

3.6 间隙比的影响

间隙比从 0.03% 增大到 0.05% 时,瓦块径向间隙从 10.5 μm 增加到了 17.5 μm ,轴承径向间隙从 5.25 μm 增加到了 8.75 μm 。图 10 比较了不同间隙比下复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚,可以看出,随着间隙比的增加,轨迹尺寸增大,轨迹中心

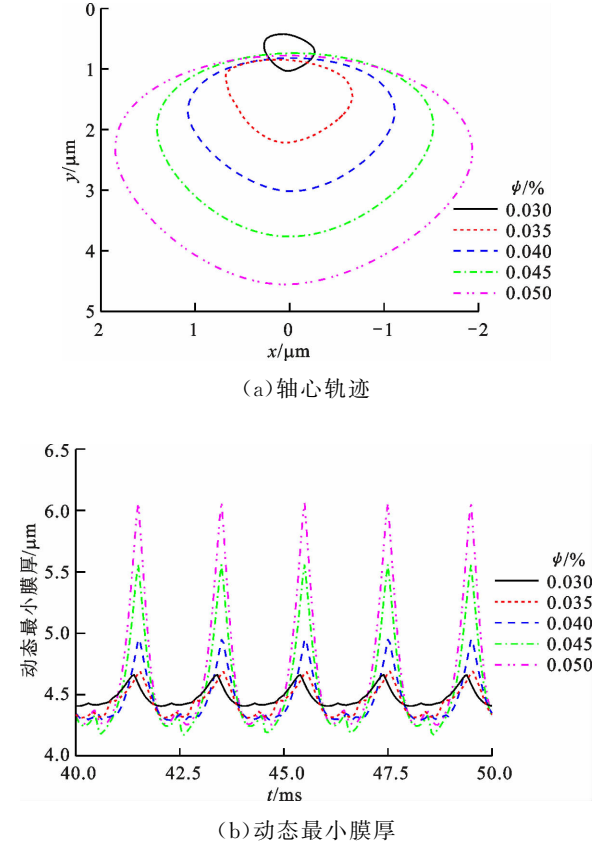


图 10 不同间隙比下的轴心轨迹和动态最小膜厚

逐渐下移远离轴承中心,最小膜厚先减小后增加。具体而言,随着间隙比从 0.03% 增大到 0.05%,轴颈在 x 方向上的振幅从 $0.27\ \mu\text{m}$ 增大到了 $1.89\ \mu\text{m}$,增大了 6 倍;在 y 方向上的振幅从 $0.31\ \mu\text{m}$ 增大到了 $1.90\ \mu\text{m}$,增大了 5.13 倍;最小膜厚呈现先减小后增加的趋势,在 0.04% 到 0.05% 之间有一个可以使最小膜厚出现极小值的间隙比。

4 结 论

本文以超导可倾瓦磁液复合轴承为研究对象,基于磁通冻结-镜像模型和考虑紊流的雷诺方程,采用解耦的分析方法对不同设计参数下复合轴承的轴心轨迹和动态最小膜厚进行了非线性动力学分析,得到的主要结论如下:

(1) 增加预负荷系数、支点系数、长径比和瓦包角,减小间隙比,可以抑制轴颈振动;增加长径比和瓦包角,减小预负荷系数和支点系数,可以改善最小膜厚。其中增加长径比对复合轴承性能的改善效果最为显著,增加瓦包角的改善效果微弱。

(2) 最佳支点系数在 62%~66% 之间,可以在显著减小轴颈振动和尽量使轨迹中心靠近轴承中心的同时保持适当的最小膜厚。在 0.04% 到 0.05% 之间存在一个会使最小膜厚出现极小值的间隙比,设计时应避开此值。

(3) 负载方向由瓦块上变为瓦块间后,轴颈在负载方向上的振幅降低了 38.9%,在垂直于负载方向上的振幅降低了 55.7%,设计时应根据负载方向调整瓦块支点角,使载荷位于瓦块之间。

超导磁力与液膜力复合的可倾瓦轴承动力学分析结果可推进这种新型轴承的应用,相关分析方法还可用于分析文献[14]介绍的 NASA 报告中的滚滑复合轴承,对更具发展前景的超导磁液与滚动复合新结构有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 段增斌,谭永华,孙宏明. 液体火箭发动机现状与发展[J]. 火箭推进, 2000, 25(4): 1-11.
DUAN Zengbin, TAN Yonghua, SUN Hongming. Liquid rocket engine status and development [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2000, 25(4): 1-11.
- [2] 苗旭升,李斌,黄智勇. 发动机涡轮泵流体动静压轴承应用分析[J]. 火箭推进, 2004, 30(6): 1-4.
MIAO Xusheng, LI Bin, HUANG Zhiyong. Application analysis of liquid hybrid bearing for engine turbopump [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30

(6): 1-4.

- [3] EDELINE E, FAYOLLE P, FONTEYN P, et al. Development and testing of a fluid-film bearing LH2 turbopump demonstrator [C] // Proceedings of the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2004: 3688.
- [4] HANNUM N P, NIELSON C E. The performance and application of high speed long life hybrid bearings for reusable rocket engine turbomachinery [C] // Proceedings of the 19th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 1983: 1389.
- [5] EGUCHI S, KOMORI M, OKUHATA T. Prototype of self-sensing magnetic bearing for liquid pump [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 126(10): 1293-1297.
- [6] ZHAO Zhongxian, CHEN Lique, YANG Qiansheng, et al. Superconductivity above liquid nitrogen temperature in new oxide systems [J]. Science Bulletin, 1987, 32(16): 1098-1102.
- [7] BARDEEN J, COOPER L, SCHRIEFFER J. Theory of superconductivity [J]. Physical Review, 1957, 108(5): 1175-1204.
- [8] ZHANG Yong, POSTREKHIN Y, MA K B, et al. Reaction wheel with HTS bearings for mini-satellite attitude control [J]. Superconductor Science and Technology, 2002, 15(5): 823-825.
- [9] HEINEN V O, SOKOLOSKI M M, ARON P R, et al. NASA space applications of high-temperature superconductors [J]. Advances in Superconductivity: IV, 1992: 11-15.
- [10] WALTER H, BOCK J, FROHNE C, et al. First heavy load bearing for industrial application with shaft loads up to 10 kN [J]. Journal of Physics Conference Series, 2006, 43(1): 995-998.
- [11] 陈润霖,许吉敏,卫洋洋,等. 超导磁力与静压液膜力复合轴承的静动特性分析 [J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 531-537.
CHEN Runlin, XU Jimin, WEI Yangyang, et al. Static and dynamic characteristics of superconducting magnetic force and hydrostatic fluid film force compound bearings [J]. Tribology, 2016, 36(5): 531-537.
- [12] 许吉敏. 超导磁力与液膜力复合轴承的应用基础研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017: 32-33.
- [13] XU Jimin, LI Changhuan, MIAO Xusheng, et al. An overview of bearing candidates for the next generation

- of reusable liquid rocket turbopumps [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1).
- [14] 王亚兵, 刘洋洋, 王报龙, 等. 轴颈倾斜的水润滑橡胶艏轴承的静态特性 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 61-69.
- WANG Yabing, LIU Yangyang, WANG Baolong, et al. Static characteristics of water lubricated rubber stern bearings with misaligned journal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 61-69.
- [15] XU Jimin, CHEN Runlin, HONG Honglun, et al. Static characteristics of high-temperature superconductor and hydrodynamic fluid-film compound bearing for rocket engine [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(6): 1-8.
- [16] XU Jimin, YUAN Xiaoyang, ZHANG Cuiping, et al. Dynamic characteristics of high-*tc* superconductor and hydrodynamic fluid-film compound bearing for rocket engine [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1-5.
- [17] HULL J R, CANSIZ A. Vertical and lateral forces between a permanent magnet and a high-temperature superconductor [J]. Journal of Applied Physics, 1999, 86(11): 6396-6404.
- [18] TAYLOR C M, DOWSON D. Turbulent lubrication theory: application to design [J]. ASME Journal of Lubrication Technology, 1974, 96(1): 36.
- [19] 王文, 张直明. 油叶型轴承非线性油膜力数据库 [J]. 上海工业大学学报, 1993, 14(4): 299-305.
- WANG Wen, ZHANG Zhiming. Nonlinear oil film force database [J]. Journal of Shanghai University of Technology, 1993, 14(4): 299-305.
- [20] ARTILES A, WALOWIT J, SHAPIRO W. Analysis of hybrid fluid film journal bearings with turbulence and inertia effects [C]//Proceedings of the Advances in Computer Aided Bearing Design. New York, USA: ASME, 1982: 25-52.
- [21] LI Zhi, IDA T, MIKI M, et al. Trapped flux behavior in melt-growth GdBCO bulk superconductor under off-axis field cooled magnetization [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 6800604.
- 杜媛英, 李明, 刘刚, 等. 混合流润滑条件下的水润滑橡胶轴承的润滑特性. 2020, 54(9): 49-57. [doi: 10. 7652/xjtuxb202009005]
- 张弘斌, 袁奇, 赵柄锡, 等. 采用多通道样本和深度卷积神经网络的轴承故障诊断方法. 2020, 54(8): 58-66. [doi: 10. 7652/xjtuxb202008008]
- 徐浩, 张刚, 张天骐. 采用形变周期势系统的轴承故障诊断方法. 2020, 54(8): 77-84. [doi: 10. 7652/xjtuxb202008010]
- 刘洋洋, 金英泽, 王亚兵, 等. 表面粗糙度对低速水润滑滑动轴承混合润滑性能的影响. 2020, 54(7): 121-128. [doi: 10. 7652/xjtuxb202007015]
- 王报龙, 王亚兵, 刘洋洋, 等. 轴系倾斜下可倾瓦推力轴承静动特性分析. 2020, 54(7): 129-138. [doi: 10. 7652/xjtuxb202007016]
- 陈书恒, 李猛, 刘恒, 等. 采用频谱细化的超声法在线测量滚动轴承保持架转速. 2020, 54(7): 139-145. [doi: 10. 7652/xjtuxb202007017]
- 郭雨, 赖天伟, 赵琪, 等. 悬臂型箔片轴承应用于高速透平的实验研究. 2020, 54(5): 40-45. [doi: 10. 7652/xjtuxb202005006]
- 王亚兵, 刘洋洋, 王报龙, 等. 轴颈倾斜的水润滑橡胶艏轴承的静态特性. 2020, 54(5): 61-69. [doi: 10. 7652/xjtuxb202005009]
- 王慧, 张刚, 张天骐. 改进型双稳随机共振系统及其在轴承故障诊断的应用. 2020, 54(4): 110-117. [doi: 10. 7652/xjtuxb202004014]
- 张西宁, 张雯雯, 周融通, 等. 采用单类随机森林的异常检测方法及应用. 2020, 54(2): 1-8. [doi: 10. 7652/xjtuxb202002001]
- 吴静然, 丁恩杰, 崔冉, 等. 采用多尺度注意力机制的旋转机械故障诊断方法. 2020, 54(2): 51-58. [doi: 10. 7652/xjtuxb202002007]
- 赵柄锡, 冀大伟, 袁奇, 等. 采用时域与时频域联合特征空间的转子系统碰磨故障诊断. 2020, 54(1): 75-84. [doi: 10. 7652/xjtuxb202001010]
- 刘弹, 李晓婉, 梁霖, 等. 采用时间序列突变点检测的滚动轴承性能退化评价方法. 2019, 53(12): 10-16. [doi: 10. 7652/xjtuxb201912002]
- 李潇潇, 闫柯, 葛临风, 等. 高速球轴承喷油润滑流场特性研究. 2019, 53(12): 17-24. [doi: 10. 7652/xjtuxb201912003]
- 陈飞, 金英泽, 袁小阳. 载荷方向对立式转子轴承润滑性能的影响. 2019, 53(12): 25-30. [doi: 10. 7652/xjtuxb202006016]

(编辑 武红江)

[本刊相关文献链接]

赵小强, 梁浩鹏. 使用改进残差神经网络的滚动轴承变工况故障诊断方法. 2020, 54(9): 23-31. [doi: 10. 7652/xjtuxb202009002]