

文章编号:1008-1542(2016)03-0230-08

doi:10.7535/hbkd.2016yx03003

静压支承动静特性及运动误差研究进展

王智伟¹, 王 峰¹, 刘 毅¹, 查 俊², 赵万华²

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 山东青岛 266590; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘 要:目前对静压支承动静特性的研究依赖于所采用的节流器形式和结构形式,主要集中在静压轴承(径向轴承和推力轴承)的油腔形状、轴承结构、轴承表面粗糙度、润滑介质和轴承弹性变形的影响,对于静压支承热效应的影响及静压导轨动静特性的研究涉及较少。对静压支承运动误差的研究大都是从运动件静力平衡出发,未考虑运动速度和结构变形对运动误差的影响。最后,从静压支承的标准化、模块化和产业化研究,静压支承的热效应研究,静压导轨的动静特性研究以及服役态下静压支承运动误差研究等方面提出研究展望。

关键词:机械摩擦;静压支承;动静特性;运动误差;误差均化;研究进展

中图分类号:TH133 文献标志码:A

Research progress of the static and dynamic characteristics and motion errors of hydrostatic supports

WANG Zhiwei¹, WANG Feng¹, LIU Yi¹, ZHA Jun², ZHAO Wanhua²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: At present, the research on static and dynamic characteristics of hydrostatic supports depend on the form and structure of the restrictor, which are mainly focused on the influences of recess shape, bearing structure, bearing surface roughness, lubricant and elastic deformations of the bearing. There are few studies on the thermal effect of hydrostatic supports and static and dynamic characteristics of hydrostatic guideways. The research on motion errors of hydrostatic supports is primarily based on the static equilibrium of the moving part. The effects of the motion speed of the moving part and structural deformation on the motion errors are not considered. Finally, the research prospects from the standardization, modularization and industrialization of hydrostatic supports, thermal effect of hydrostatic bearing, the static and dynamic characteristics of hydrostatic guideways and motion errors of hydrostatic supports under operating conditions are concluded.

Keywords: mechanical friction; hydrostatic supports; static and dynamic characteristics; motion errors; error averaging; research progress

收稿日期:2015-11-21;修回日期:2016-01-12;责任编辑:李 穆

基金项目:国家自然科学基金(51505260);山东科技大学人才引进科研启动基金(2014RCJJ022)

作者简介:王智伟(1981—),男,江苏盐城人,博士,主要从事液体静压支承设备及性能方面的研究。

E-mail:zwwang@live.com

王智伟,王 峰,刘 毅,等.静压支承动静特性及运动误差研究进展[J].河北科技大学学报,2016,37(3):230-237.

WANG Zhiwei, WANG Feng, LIU Yi, et al. Research progress of the static and dynamic characteristics and motion errors of hydrostatic supports [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 230-237.

“十二五”规划中把改造和提升装备制造业作为纲要,机床作为“工作母机”,是现代装备制造业的基础,对于振兴中国装备制造业起着非常重要的作用。影响机床性能的因素除了控制系统和伺服系统等以外,还与机械系统功能部件的特性有关。所以机床的发展离不开构成其最基本的功能部件的发展。目前中国对机床特别是高档机床功能部件的整体研发水平与发达国家相比还存在较大差距,主要问题体现在发展滞后、品种少、产业化程度低、技术水平不高和质量不高,远远不能满足市场的需求,特别是不能满足高档机床的市场发展需求,有些产品不得不依赖进口^[1]。但国外进口产品不仅价格昂贵,而且关键技术还对中国严格保密和封锁,这些都严重地制约着中国高档机床的前进的步伐。

支承系统作为机床的关键功能部件,它的特性对机床的精度、加工表面质量以及可靠性等性能起着关键性的作用。这是因为机床加工的实现绝大部分是将高精度、高刚度的机床运动通过刀具再正确地复印到工件上^[2]。目前用于超精密机床的支承系统包括:滚动轴承、油润滑轴承、气体润滑轴承以及磁力轴承等,其主要性能如表1^[3]所示。

表1 不同类型轴承性能比较

Tab.1 Performance comparison of different types of bearings

比较项目	滚动轴承	油润滑		气体润滑		磁力轴承
		动压轴承	静压轴承	动压轴承	静压轴承	
总体	优	优	特优	优	特优	优
负荷容量	特优	优	特优	劣	优	劣
静刚度	特优	优	特优	劣	优	劣
抗振性	劣	特优	特优	普通	普通	普通
高速性	普通	优	普通	优	特优	特优
温升	优	劣	普通	特优	特优	特优
维护性	特优	优	普通	优	普通	优
寿命	普通	普通	特优	普通	特优	特优
费用	特优	优	劣	普通	劣	劣

其中滚动轴承在机床上的应用最为广泛,但滚动轴承的抗振性差^[4]。静压支承的阻尼要远远大于滚动导轨,同时静压支承还具有摩擦阻力小、刚度高、运动精度高以及适应性好等特点^[5],所以对于阻尼和精度要求非常高的场合上(比如精密和超精密机床)静压支承有着广泛的应用。

1 静压支承国内外研究现状

1.1 静压支承动静态特性的研究现状

对静压支承动静态特性的研究主要集中在油腔形状、轴承结构、轴承表面粗糙度、润滑介质和轴承弹性变形的影响。

1.1.1 油腔形状和轴承结构对静压支承性能影响方面的研究

SINGH等^[6]对定压供油的静压推力轴承的刚度优化进行了研究,分别对圆形腔瓦和矩形瓦的刚度性能进行了优化,对定压供油推力轴承给出了最优的几何形状。PRABHU等^[7-10]分析多油腔的静压推力轴承的倾斜对轴承性能的影响,发现油腔的半径率、腔型和旋转惯性力对承载能力及润滑性能都有一定影响。OSMAN等^[11]对动载情况下采用环型槽油腔的静压推力轴承进行了研究,分析了半径率、油腔数和倾斜参数对承载能力、轴承刚度、阻尼系数和流量的影响。OSMAN等^[12]还对比研究了2种不同油腔结构的静压推力轴承,实验测量了油膜厚度、油腔压力、压力分布以及流量,理论和实验研究发现油腔的尺寸和位置对静压推力轴承的性能有较大影响。SHARMA等^[13-14]用有限元的方法对比研究了不同油腔形状(圆形、矩形、椭圆形、三角形及环形)对静压推力轴承性能的动静态性能的影响,研究表明圆形油腔有利于减小流量;环形油腔有利于提高承载力和油膜刚度;椭圆形油腔有利于提高油膜阻尼特性;三角形油腔有利于提高临界转速。SINGH^[15]还在考虑轴承弹性变形的情况下理论研究了不同油腔形状对静压轴承或动静压轴承性能的影响,得出了与上述相似的结论。

研究人员理论分析了轴向槽静压轴承的动静态特性以及热特性,针对轴向槽的每个位置采用一阶扰动法求解了油膜的刚度系数和阻尼系数,并分析了轴承的稳定性,研究发现当轴向槽处于 12° 时轴承承载力和流量最大,轴向槽夹角和轴向槽长度越小则刚度系数和阻尼系数越大,油温升高会导致润滑油粘度减小以及承载力下降,增加轴的转速会导致承载力、流量以及温度的增加^[16-22]。MASUKO等^[23]综合考虑节流器到油腔的润滑油可压缩性、管路的弹性变形以及混入润滑油中的空气,研究了流体的容积效应对静压导轨瞬态响应的影响,分析了静压导轨在阶跃载荷下的超调量。通过理论和实验方法研究发现超调量随着液容的增大而增加。

1.1.2 轴承表面粗糙度对静压支承性能影响方面的研究

LIN等^[24]研究了轴承表面粗糙度对立式止推静压轴承的动刚度和阻尼特性的影响。综合考虑了存在转动惯量下随机的雷诺方程和可压缩流体的流量连续方程。采用小扰动的方法来求解轴承的动态系数,结果表明粗糙的图案以及粗糙度的值对刚度和阻尼有很大的影响,圆周形的粗糙度结构形状相对于光滑表面的轴承可以提高轴承的刚度和阻尼特性,而发射状的粗糙就与此相反。YACOUT等^[25]假定粗糙度在静压球面轴承表面是随机分布的,通过雷诺方程的求解得到了压力分布公式、承载力、流量、摩擦力矩、摩擦系数、功率因数、功率损耗和刚度因子。综合考虑转动惯量和表面粗糙度对静压轴承性能的影响。基于最小功率损耗、最小流量和最佳节流尺寸在理论上得出了一个合适的设计方法。NADUVINAMANI等^[26]综合考虑了磁流变流体磁场与轴承表面粗糙度对多孔轴承的影响。研究发现磁场作用可以显著增强轴承的承载能力,多孔轴承表面周向分布的粗糙度相对于光滑的轴承表面是提高承载力,径向分布的粗糙度则减小了承载力。NAGARAJU等^[27]综合考虑了轴承弹性变形和表面粗糙度对采用小孔节流的动静压混合轴承性能的影响,对比研究了周向分布、径向分布以及等方向分布的粗糙度对轴承性能的影响,研究表明轴瓦的弹性变形减小了轴承的承载力和油膜的刚度,但是通过合理的设计粗糙度的形貌可以抵消一部分变形引起的性能损失。SINANOG LU等^[28]运用神经网络方法分析了轴表面粗糙度对径向轴承压力分布的影响,并把分析的结果与实验进行了对比。研究表明梯形的表面形貌的轴承承载力要大于表面形貌为锯齿形的轴承。GUHA^[29]分析了等方向分布的粗糙度对偏斜动压径向轴承稳态特性的影响。针对不同值的粗糙度误差对承载力、方位角、流量、摩擦系数以及偏斜力矩进行了研究。结果发现承载力和偏斜力矩随着粗糙度的增加而减小;方位角和流量随着粗糙度的增加而增大。CHIANG等^[30]综合考虑了表面粗糙度和润滑液体的耦合应力对采用动压有限径向轴承性能的影响,采用CHRISTENSEN随机模型^[31]来描述轴承表面粗糙度,并运动共轭梯度方法反复迭代求解油膜压力分布。研究发现长轴承中粗糙度的影响要大于短轴承;周向分布和径向分布粗糙度对轴承性能的影响趋势是相反的,其临界值是轴承的长径比为1.1时。TURAGA等^[32-33]也采用随机模型来表达表面粗糙度,研究了周向分布、径向分布以及等方向分布的粗糙度对动压轴承稳定特性和动态特性的影响。结果表明周向分布的粗糙度可以提高轴承的稳定性以及增加承载力;径向分布和等方向分布的粗糙度则减弱了稳定性和承载力。

1.1.3 主动控制及润滑介质对静压支承性能影响方面的研究

CAI等^[34]介绍了一种采用电磁力来主动控制调节的静压或动静压轴承,文中针对倾斜油垫轴承动态特性可调给出了一种先进非线性前馈控制框架,采用该种控制方法可以使轴承稳定的运动。HESSELBACH等^[35]设计了一种磁流变(MR)流体润滑主动控制静压轴承,可以通过MR流体改变磁场的流变特性,进而可以使得轴承在外载荷的作用下保持轴承间隙恒定。此外MR静压轴承对外载荷的响应时间要明显短于传统静压轴承。OSMAN等^[36]研究了采用铁磁流体的磁力径向轴承的动静态特性,通过把磁力的分布代入到雷诺方程中并采用有限差分法求解最终得到压力分布。文中认为要显著提高轴承的性能不但要合理设计磁场模型,同时还要正确选择轴承设计参数。如果合适的磁场分布模型被采用的话,磁力可以增加轴承的承载能力,同时轴承的侧泄会显著减小,但磁力对轴承方位角以及摩擦力的影响较小。MOROSI等^[37]建立了一个主动控制气体轴承的模型,该主动控制气体轴承的控制原理是通过安装在轴套背面的压电触发器控制气体在径向的进入,进而产生主动作用力的效果。通过理论分析发现这种新型的轴承对于传统的气体轴承有很多优势,包括显著减小了同步振动和提高了瞬态响应特性。

NIKOLAKOPOULOS等^[38-39]给出了一种以电流变(ER)流体作为润滑剂的径向轴承,在转子和定子之

间存在的电场可以改变轴承的动态特性,并采用实验的方法把该种轴承的偏心率、方位角以及刚度系数用电场来进行函数化。研究表明轴承的动态响应时间和振动在电场的作用下显著减小,此外电场对轴承稳定性影响较小,载荷越大对稳定性的影响就会越大。BOUZIDANE 等^[40]研究了以一种阴性电流变(NER)流体作为润滑剂的新型静压径向轴承的动态行为。所谓电流变(ER)流体就是微米级的粒子悬浮在一种绝缘的流体中。这种 NER 流体是一种牛顿流体且在电场的作用下粘度会降低,电场撤去后粘度还可以很快恢复。用数值方法建立了 NER 静压径向轴承的一种线性模型,该模型可以用来研究 NER 流体、油腔压力和偏心率对承载力、流量、刚度系数和阻尼系数的影响。结果表明在偏心率为零时电场对轴承的刚度几乎没有影响,当转速为临界转速 1.4 倍时必须激活电场,这是为了降低润滑流体的粘度来保证不增加转子的振动。

LIN^[5]综合考虑了流体耦合应力、流体的惯性和可压缩性,研究了静压推力轴承的稳态性能、动刚度以及阻尼特性。当耦合应力参数接近于零时润滑流体就变成了牛顿流体。研究发现轴承的承载力和流量随着流体惯性的减小而减小,而流体耦合应力的存在起到减小流量的作用,流体的耦合应力增加了轴承的动刚度和阻尼特性。WANG 等^[41-43]综合考虑热和气蚀效应,理论地研究了流体耦合应力对径向轴承的影响,研究表明相对于牛顿流体润滑,耦合应力流体润滑可以增加承载力,减小摩擦系数、少量增加了润滑油温度以及微量减小了流量。GUHA^[44]理论分析了采用耦合应力流体的多孔静压轴承的线性稳定性能,采用油膜厚度和稳态油膜压力的一阶扰动法求解了不同耦合应力参数条件下的轴承稳定参数,结果显示增加耦合应力参数会使轴承的稳定性变差。

1.1.4 轴承弹性变形对静压支承性能影响方面的研究

LIU 等^[45]运用计算流体动力学(CFD)与流固耦合(FSI)方法研究了回转轴承的动态响应,并对比分析了不同轴承材料对转子不平衡运动的影响。研究表明轴承的弹性变形对轴承系统有很大的影响,特别是使用聚合基材料时;当作用于转子的不平衡力大于静态载荷的 10% 时,该不平衡力就会对转子的运动产生较大的影响。LU 等^[46]也应用 CFD-FSI 方法对静压轴承的静刚度进行了分析,发现在不考虑温升和压力分布的影响时结构变形导致轴承的静刚度减小了大约 78%。SHARMA 等^[47]综合考虑了轴承弹性变形和热对采用小孔节流的动静压混合轴承性能的影响,其中轴承弹性变形来源于油膜的压力以及润滑油温度升高产生的热变形。研究指出润滑油温度升高导致的润滑油粘度的降低对轴承动静态特性有很大的影响;轴承变形的增大会导致轴承流量的加大;在外载荷和节流参数一定的情况下油膜的最小厚度随着变形的增大而减小;通过合理的设计节流参数可以部分补偿热和变形导致的稳定性的损失。MANRING 等^[48]认为静压推力轴承为线性变形,对比研究了内凹变形和凸起变形对静压轴承压力分布、流量以及承载力的影响。研究发现轴承的变形(不管是内凹变形还是凸起变形)都会导致流量的增加,但内凹变形导致的流量的增大量要大于凸起变形导致的;内凹变形能增加轴承的承载力,而凸起变形则减小了轴承的承载力;采用较大的油腔尺寸可以减小变形。WANG 等^[49-50]采用理论和实验的方法研究了静压推力轴承变形对承载力、油腔压力、油膜厚度、流量、功率损失以及刚度的影响。并且认为弹性材料的杨氏模量与应力和应变之间是非线性的关系。研究发现轴承的承载力不仅与供油压力有关,还与材料的弹性模量有关。王茜等^[51]引入有限体积法将空气静压导轨受力特性方程与气体流动方程相结合构成耦合方程体系,对导轨润滑气膜在等温条件下的非定常流动进行数值分析,研究了气膜建立初期的导轨振动及气膜动刚度特性。叶树亮等^[52]同样应用有限体积法研究了空气静压导轨的力学特性,指出气膜与导轨之间的气固耦合所引起的导轨弹性自激振动是影响静压导轨实现纳米级定位的主要制约因素。王智伟等^[53]针对环形缝隙节流闭式油静压导轨,以封油面上动态雷诺方程和导轨的弹性变形方程为基础,再结合导轨工作台动力平衡方程,建立了静压导轨的流固耦合模型。研究表明,导轨压板的变形随油腔压力的增加而线性增加;导轨压板的变形会导致动静刚度减小,也会导致阶跃响应的过渡时间变长。

综合上述静压支承动静态特性的研究现状,可以发现对恒压式静压支承的动静态特性的研究依赖于所采用的节流器形式和结构形式,不同的节流器和结构对应的静压支承具有不同的特性,另外目前的研究主要还是针对静压轴承(径向轴承或推力轴承)来进行的,由于静压导轨的支承形式和受力方式还是有别于静压轴承的,所以有必要建立液体静压导轨模型,以此来研究静压导轨的动静态特性。此外对静压轴承热效应研究不多,以及热对结构变形、润滑油粘度、静压轴承动静特性的影响也涉及较少。

1.2 静压支承运动误差的研究现状

SHAMOTO等^[54]忽略了流体的可压缩性和油膜挤压效应,基于单油垫采用有限单元法分析了不同空间频率的导轨几何形状误差与油膜波动力之间的关系,再以工作台静力平衡为基础建立了多腔静压导轨的运动误差模型。该模型可以在已知导轨面几何误差的情况下预测静压导轨的运动误差,反过来也可以在测得导轨运动误差的情况下估计导轨面的几何误差。作者认为供油压力不影响运动误差;为了达到减小静压导轨运动误差的目的,该模型也可以用来指导导轨面的研磨,导轨面经过研磨后静压导轨的运动误差从 $0.32\ \mu\text{m}$ 和 $4.14\ \text{arcsec}$ 减小到 $0.07\ \mu\text{m}$ 和 $1.42\ \text{arcsec}$ 。EKINCI等^[55-56]把气膜支承简化成弹簧单元,并基于工作台增量式移动过程中每个位置的静态平衡建立了气浮导轨的运动误差模型。理论实验的方法研究了不加预载和加预载情况下气浮导轨工作台的直线度误差和俯仰,结果表明加预载可以减小直线度误差,但是加预载对俯仰没有影响。PARK等^[57-60]针对单个油垫运用传递函数提出了一种新的用来分析静压导轨工作台的运动误差的模型,进而根据模型分析结果给出导轨的加工法则来提高工作台的运动精度,并对模型进行了实验验证。薛飞等^[61-62]把存在轮廓误差的油膜厚度进行平均化处理,这样可以减小油膜力计算的运算量,再运用工作台静平衡的理论方法建立了四腔闭式静压导轨的运动误差的理论模型,针对全波长范围的轮廓误差分量分析了均化作用的影响因素,并提出了减小运动误差的措施。齐乃明等^[63]采用解析法分析了气浮导轨的误差均化作用,研究了滑块长度、行程以及导轨面的几何误差对气浮导轨直线度误差的影响。李东升等^[64-65]将气体静压轴系径向节流孔所在截面简化成平面汇交力系,并与边界约束条件一起构成误差方程,应用静力学的理论求解出气体静压轴承在典型状态下的误差均化值,为轴系几何精度设计提供了理论依据。研究表明节流孔越多则误差均化效果越好,但当节流孔的数量超过10个时,均化效应越来越不显著。申涛等^[66]建立了丝杠螺母副的传动误差模型,以螺旋线误差为主分析了螺母有效长度和丝杠误差周期对空气静压丝杠的误差均化作用的影响。研究发现丝杠的有效圈数越大误差均化效果越明显;降低丝杠螺旋线误差的周期可以降低丝杠螺母副的传动误差。孙方金^[67]把由于轴和孔的不圆度形成的间隙分成与节流数相等的 N 个单元(等效狭缝),则每个单元对应不同的间隙,每个等效狭缝对应1个径向力,列出这些径向力的平衡方程。通过求解该方程就可以得到轴承的回转误差。研究发现增加节流孔数目、提高轴承刚度以及改善气源压力的稳定度有利于改善空气静压轴承的径向回转误差。ALEYAASIN等^[68]假定轴承误差为椭圆形误差,每个轴承被简化为8个刚度和阻尼系数,通过优化刚度和阻尼系数使得轴承的运动误差最小。但此文中只解决了振动方面的问题,并未考虑流体动力学方面的问题。WANG等^[69]采用傅里叶级数拟合导轨的轮廓误差,并基于工作台的动力平衡,就运动速度对传统闭式液体静压导轨运动误差的影响进行了理论和实验研究。

可以看出先前对静压支承运动误差的研究大都是从运动件静力平衡出发,未考虑运动件的运动速度对运动误差的影响。而在机床的加工过程中运动部件多数情况都是在不同的速度下运动的。因此在考虑静压支承运动部件的运动速度的情况下,研究静压支承运动误差更接近于实际工况,由此提出的有关提高静压支承运动精度的措施更为有效。

2 研究展望

纵观国内外的专家和学者对静压支承的动静特性及运动误差研究,目前出现了如下发展动态。

1)静压支承属于个性化应用,不同厂家产品有不同尺寸样式的静压支承,目前没有像滚动支承那样的通用型产品出现,不利于大规模生产。因此针对静压支承标准化、模块化和产业化的研究将具有重要的意义。此外,传统静压支承相对于滚动支承的缺点是费用较高、安装调试比较费时以及空间占用较大,这些都限制了这项技术的使用范围。因此可以提出综合滚动支承和静压支承两者优点的产品,以此作为研究对象。这类产品将扩大静压支承的应用范围。

2)综合上述静压支承动静态特性的研究现状,可以发现对静压轴承热效应研究不多,静压轴承的旋转速度一般较高,所以旋转轴运动产生的热对结构变形、润滑油粘度、静压轴承动静特性的影响可以进一步研究。此外目前的研究大多还是针对静压轴承(径向轴承或推力轴承)来进行的。由于静压导轨的支承形式和受力方式还是有别于静压轴承的,所以有必要建立精确的静压导轨模型,以此来研究静压导轨的动静态特性,为静压导轨运动误差模型的建立提供理论基础。

3)综合上述静压支承误差均化的研究现状,可以看出先前对静压支承运动误差的研究大都是从运动件静力平衡出发,未考虑运动件的运动速度、变形以及热载荷对运动误差的影响,因此综合考虑运动速度、工作载荷、变形和热载荷的情况下,研究静压支承运动误差更接近于机床的服役态情况,由此提出的有关提高静压导轨运动精度的措施更为有效。

参考文献/References:

- [1] 徐吉存. 浅谈国产机床功能部件产业化发展[J]. 航空制造技术, 2012(4): 52-53.
XU Jicun. Industrialization development of functional part of domestic machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012 (4): 52-53.
- [2] 庞滔,郭大春,庞楠. 超精密加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000:12-15.
- [3] 于晓东. 重型静压推力轴承力学性能及油膜态数值模拟研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2007.
YU Xiaodong. Research on Numerical Simulation of Oil Film State and Mechanics Properties of Heavy Type Hydrostatic Thrust Bearing [D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2007.
- [4] ALTINTAS Y, VERL A, BRECHER C, et al. Machine tool feed drives[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011 (60): 779-796.
- [5] LIN J R. Static and dynamic characteristics of externally pressurized circular step thrust bearings lubricated with couple stress fluids[J]. Tribology International, 1999, 32 (4): 207-216.
- [6] SINGH C, SINGH D. Stiffness optimization of a variable restrictor-compensated hydrostatic thrust bearing system[J]. Wear, 1977, 44(2): 223-230.
- [7] PRABHU T J, GANESAN N. Finite element application to the study of hydrostatic thrust bearings[J]. Wear, 1984, 97 (2): 139-154.
- [8] PRABHU T J, GANESAN N. Analysis of multirecess conical hydrostatic thrust bearings under rotation[J]. Wear, 1983, 89 (1): 29-40.
- [9] PRABHU T J, GANESAN N. Effects of tilt on the characteristics of multirecess hydrostatic thrust bearings under conditions of no rotation[J]. Wear, 1983, 92 (2): 269-277.
- [10] PRABHU T J, GANESAN N. Behaviour of multirecess plane hydrostatic thrust bearings under conditions of tilt and rotation[J]. Wear, 1983, 92 (2): 243-251.
- [11] OSMAN T, SAFAR Z, MOKHTAR M. Design of annular recess hydrostatic thrust bearing under dynamic loading[J]. Tribology International, 1991, 24 (3): 137-141.
- [12] OSMAN T, DORID M, SAFAR Z, et al. Experimental assessment of hydrostatic thrust bearing performance[J]. Tribology International, 1996, 29 (3): 233-239.
- [13] SHARMA S C, JAIN S, BHARUKA D. Influence of recess shape on the performance of a capillary compensated circular thrust pad hydrostatic bearing[J]. Tribology International, 2002, 35 (6): 347-356.
- [14] RAJASEKHAR N E, SHARMA S C. Orifice compensated multirecess hydrostatic/hybrid journal bearing system of various geometric shapes of recess operating with micropolar lubricant[J]. Tribology International, 2011, 44 (3): 284-296.
- [15] SINGH N, SHARMA S C, JAIN S, et al. Performance of membrane compensated multirecess hydrostatic/hybrid flexible journal bearing system considering various recess shapes[J]. Tribology International, 2004, 37 (1): 11-24.
- [16] ROY L, LAHA S. Steady state and dynamic characteristics of axial grooved journal bearings[J]. Tribology International, 2009, 42 (5): 754-761.
- [17] ROY L, CHOUDHURY P. On the steady state and dynamic characteristics of oil journal bearings with multiple axial grooves[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2006, 2 (6): 29-36.
- [18] SINGH U, ROY L, SAHU M. Steady-state thermo-hydrodynamic analysis of cylindrical fluid film journal bearing with an axial groove [J]. Tribology International, 2008, 41 (12): 1135-1144.
- [19] MAJUMDAR B, PAI R, HARGREAVES D. Analysis of water-lubricated journal bearings with multiple axial grooves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2004, 218 (2): 135-146.
- [20] COSTA L, FILLON M, MIRANDA A, et al. An experimental investigation of the effect of groove location and supply pressure on the THD performance of a steadily loaded journal bearing[J]. Journal of Tribology, 2000, 122: 227-232.
- [21] PAI R, PAI R B, MAJUMDAR B, et al. Comparison of static performance characteristics of 3-Axial groove water lubricated journal bearings; Reynolds and JFO models[C]//Proceedings of the International Tribology Conference. [S.l.]:[s.n.], 2006.
- [22] PAI R. Stability of four-axial and six-axial grooved water-lubricated journal bearings under dynamic load[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2008, 222 (5): 683-691.
- [23] MASUKO M, NAKAHARA T. The influences of the fluid capacitance in the oil feed line system on the transient response of hydrostatic guideways[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research, 1974, 14 (3): 233-244.

- [24] LIN J R. Surface roughness effect on the dynamic stiffness and damping characteristics of compensated hydrostatic thrust bearings[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40 (11): 1671-1689.
- [25] YACOUT A W, ISMAEEL A S, KASSAB S Z. The combined effects of the centripetal inertia and the surface roughness on the hydrostatic thrust spherical bearings performance[J]. *Tribology International*, 2007, 40 (3): 522-532.
- [26] NADUVINAMANI N, HANUMAGOWDA B, TASNEEM FATHIMA S. Combined effects of MHD and surface roughness on couple-stress squeeze film lubrication between porous circular stepped plates[J]. *Tribology International*, 2012, 56: 19-29.
- [27] NAGARAJU T, SHARMA S C, JAIN S. Study of orifice compensated hole-entry hybrid journal bearing considering surface roughness and flexibility effects[J]. *Tribology International*, 2006, 39 (7): 715-725.
- [28] SINANOGLU C, NAIR F, KARAMIS M B. Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure distribution[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 168 (2): 344-353.
- [29] GUHA S. Analysis of steady-state characteristics of misaligned hydrodynamic journal bearings with isotropic roughness effect[J]. *Tribology International*, 2000, 33 (1): 1-12.
- [30] CHIANG H L, HSU C H, LIN J R. Lubrication performance of finite journal bearings considering effects of couple stresses and surface roughness[J]. *Tribology International*, 2004, 37 (4): 297-307.
- [31] CHRISTENSEN H. Stochastic models for hydrodynamic Lubrication of rough surfaces[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1969, 184: 1013-1026.
- [32] TURAGA R, SEKHAR A, MAJUMDAR B. Stability analysis of a rigid rotor supported on hydrodynamic journal bearings with rough surfaces using the stochastic finite element method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1998, 212 (2): 121-130.
- [33] TURAGA R, SEKHAR A, MAJUMDAR B. The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces[J]. *Tribology International*, 1999, 32 (5): 231-236.
- [34] CAI Z, de QUEIROZ M, KHONSARI M. On the active stabilization of tilting-pad journal bearings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 273: 421-428.
- [35] HESSELBACH J, ABEL-KEILHACK C. Active hydrostatic bearing with magnetorheological fluid[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93: 8441-8443.
- [36] OSMAN T, NADA G, SAFAR Z. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid[J]. *Tribology International*, 2001, 34 (6): 369-380.
- [37] MOROSI S, SANTOS I F. Active lubrication applied to radial gas journal bearings. Part 1: Modeling[J]. *Tribology International*, 2011, 44: 1949-1958.
- [38] NIKOLAKOPOULOS P, PAPADOPOULOS C. Controllable high speed journal bearings, lubricated with electro-rheological fluids. An analytical and experimental approach[J]. *Tribology International*, 1998, 31 (5): 225-234.
- [39] NIKOLAKOPOULOS P, PAPADOPOULOS C. Controllable misaligned journal bearings, lubricated with smart fluids[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, 8 (2): 125-137.
- [40] BOUZIDANE A, THOMAS M. An electrorheological hydrostatic journal bearing for controlling rotor vibration[J]. *Computers and Structures*, 2008, 86 (3-5): 463-472.
- [41] WANG X L, ZHU K Q, GUI C L. A study of a journal bearing lubricated by couple stress fluids considering thermal and cavitation effects[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2002, 216 (5): 293-305.
- [42] WANG X L, ZHU K Q, WEN S Z. On the performance of dynamically loaded journal bearings lubricated with couple stress fluids[J]. *Tribology International*, 2002, 35 (3): 185-191.
- [43] WANG X L, ZHU K Q, WEN S Z. Thermohydrodynamic analysis of journal bearings lubricated with couple stress fluids[J]. *Tribology International*, 2001, 34 (5): 335-343.
- [44] GUHA S. Linear stability performance analysis of finite hydrostatic porous journal bearings under the coupled stress lubrication with the additives effects into pores[J]. *Tribology International*, 2010, 43 (8): 1294-1306.
- [45] LIU H, XU H, ELLISON P J, et al. Application of computational fluid dynamics and fluid-structure interaction method to the lubrication study of a rotor-bearing system[J]. *Tribology Letters*, 2010, 38 (3): 325-336.
- [46] LU L, SU H, LIANG Y, et al. Research on static stiffness of hydrostatic bearing using fluid-structure interaction analysis[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 1304-1308.
- [47] SHARMA S C, KUMAR V, JAIN S, et al. Study of hole-entry hybrid journal bearing system considering combined influence of thermal and elastic effects[J]. *Tribology International*, 2003, 36 (12): 903-920.
- [48] MANRING N D, JOHNSON R E, CHERUKURI H P. The impact of LINear deformations on stationary hydrostatic thrust bearings[J]. *Journal of Tribology*, 2002, 124: 874-877.
- [49] WANG X, YAMAGUCHI A. Characteristics of hydrostatic bearing/seal parts for water hydraulic pumps and motors. Part 1: Experiment and theory[J]. *Tribology International*, 2002, 35 (7): 425-433.
- [50] WANG X, YAMAGUCHI A. Characteristics of hydrostatic bearing/seal parts for water hydraulic pumps and motors. Part 2: On eccentric loading and power losses[J]. *Tribology International*, 2002, 35 (7): 435-442.

- [51] 王茜,吴剑进,李东升,等. 气固耦合空气静压导轨气膜非定常流动分析[J]. 润滑与密封, 2008, 33(9): 28-30.
WANG Qian, WU Jianjin, LI Dongsheng, et al. Unsteady flow analysis of aerostatic bearing under flow/structure coupled condition[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(9): 28-30.
- [52] 叶树亮,李东升. 应用有限体积法研究空气静压导轨力学特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 809-814.
YE Shuliang, LI Dongsheng. Study on mechanical characteristics of aerostatic bearing with finite volume method[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 809-814.
- [53] 王智伟,查俊,陈耀龙,等. 流固耦合对油静压导轨动静特性的影响[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 148-152.
WANG Zhiwei, ZHA Jun, CHEN Yaolong, et al. Influencing of fluid-structure interactions (FSI) on static and dynamic characteristics of oil hydrostatic guideways[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 148-152.
- [54] SHAMOTO E, PARK C H, MORIWAKI T. Analysis and improvement of motion accuracy of hydrostatic feed table[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50 (1): 285-290.
- [55] EKINCI T, MAYER J. Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47: 1997-2004.
- [56] EKINCI T, MAYER J, CLOUTIER G M. Investigation of accuracy of aerostatic guideways[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49 (6): 478-487.
- [57] PARK C H, OH Y J, LEE C H, et al. Theoretical Verification on the motion error analysis method of hydrostatic bearing tables using a transfer function[J]. International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2003, 4 (2): 64-70.
- [58] PARK C H, OH Y J, LEE C H, et al. Experimental verification on a motion error analysis method of hydrostatic bearing tables using a transfer function[J]. International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2003, 4 (2): 57-63.
- [59] PARK C H, OH Y J, LEE H. Corrective machining algorithm for improving the motion accuracy of hydrostatic bearing tables[J]. International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2004, 5 (2): 60-67.
- [60] PARK C H, OH Y J, LEE H. Experimental verification on the corrective machining algorithm for improving the motion accuracy of hydrostatic bearing tables[J]. International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 2004, 5 (3): 62-68.
- [61] XUE F, ZHAO W, CHEN Y, et al. Research on error averaging effect of hydrostatic guideways[J]. Precision Engineering, 2012 (36): 84-96.
- [62] 薛飞,赵万华. 静压导轨误差均化效应影响因素研究[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(11): 33-36.
XUE Fei, ZHAO Wanhua. Influencing factors on error averaging effect of hydrostatic guideway[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11): 33-36.
- [63] 齐乃明,陶家生,关英姿,等. 气浮导轨误差均化作用的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1): 61-63.
QI Naiming, TAO Jiasheng, GUAN Yingzi, et al. Research on aerostatic slideway error balance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(1): 61-63.
- [64] 李东升,赵军,陆艺,等. 气体静压轴系误差均化机理的静力学模型分析方法[J]. 中国计量学院学报, 2005, 16(2): 103-107.
LI Dongsheng, ZHAO Jun, LU Yi, et al. Analysis methods of error averaging mechanism of aerostatic bearings based on the statics model[J]. Journal of China Jiliang University, 2005, 16(2): 103-107.
- [65] 郑颖君,李东升. 气体静压轴系径向回转误差均化机理的研究[J]. 工具技术, 2002, 36(2): 38-40.
ZHENG Yingjun, LI Dongsheng. Study on averaging mechanism of radial rotating errors of aerostatic bearings[J]. Tool Engineering, 2002, 36(2): 38-40.
- [66] 申涛,孙雅洲,卢泽生. 气体静压丝杠误差均化作用的研究[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(4): 18-21.
SHEN Tao, SUN Yazhou, LU Zesheng. Research on error balancing function of aerostatic lead screw[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(4): 18-21.
- [67] 孙方金. 空气静压轴承径向回转精度的分析[J]. 仪器仪表学报, 1991, 12(3): 324-328.
SUN Fangjin. Analysis of radial rotation accuracy of air hydrostatic bearings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1991, 12(3): 324-328.
- [68] ALEYAASIN M, WHALLEY R, EBRAHIMI M. Error correction in hydrostatic spindles by optimal bearing tuning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40: 809-822.
- [69] WANG Zhiwei, ZHAO Wanhua, CHEN Yaolong, et al. Prediction of the effect of speed on motion errors in hydrostatic guideways[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 64: 78-84.