

高速精密电主轴转子动力学研究进展^{*}

蒋书运

(东南大学机械工程学院 南京, 211189)

摘要 现代高速精密切削对电主轴动态性能的要求不断提高,结构的复杂化、运行的高速化、轴承的多样化向电主轴转子动力学设计提出了新的挑战。针对此问题,综合运用滚动轴承分析理论、流体润滑理论与转子动力学理论,建立滚动轴承电主轴、空气轴承电主轴、水润滑轴承电主轴与组合轴承电主轴转子动力学模型,并开发了计算软件。基于性能分析结果,设计了多款高速精密电主轴产品。结果表明:取得的电主轴转子动力学成果为电主轴动态设计提供了理论支撑,所设计的高速精密电主轴产品在国内高端数控装备中获得成功应用,解决了核心功能部件的国产化难题。

关键词 电主轴;转子动力学;滚动轴承分析;润滑理论
中图分类号 TH12

引言

电主轴作为高速切削加工机床的核心功能部件,被誉为机床的“心脏”。电主轴全称为内置电机机床主轴单元,其具有结构紧凑、质量轻、惯性小、振动小、噪音低、响应快以及易于实现主轴定位和准停等突出的专业化生产技术优势。

电主轴的动态性能直接决定机床的使用性能,开展电主轴的转子动力学分析是电主轴设计的主要环节。高速精密电主轴的常用支承方式有滚动轴承、滑动轴承与磁悬浮轴承等,其中滑动轴承按照润滑介质,可分为空气轴承、油润滑轴承与水润滑轴承等。笔者结合多年来的电主轴研发经历,阐述了在滚动轴承电主轴、空气轴承电主轴、水润滑轴承电主轴与组合支承电主轴转子动力学理论方面的研究进展。

1 滚动轴承电主轴转子动力学

1.1 电主轴转子-滚动轴承系统动力学

电主轴结构示意图如图 1 所示。复杂结构电主轴及其双转子耦合动力学模型如图 2 所示。高速铣削加工电主轴内含刀具夹持机构,而深孔内圆磨削电主轴采用阶梯形长悬臂外壳,见图 2(a)。

虽然该两类典型电主轴均为复杂的双转子耦合系统,但国内外现有文献将其简化为单转子-轴承动力学模型。按照转子动力学理论,将铣削电主轴或深孔内圆磨削电主轴简化为单转子动力学模型,存在模型过于简化而不能描述其动力学行为的问题。

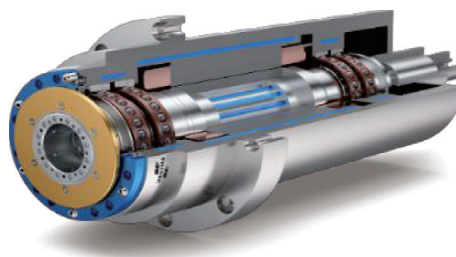


图 1 电主轴结构示意图

Fig.1 Schematic view of motorized spindle

笔者将深孔内圆磨削电主轴转子-轴承-长悬臂外壳系统简化为双转子系统,并将铣削加工电主轴刀具拉杆与主轴转子简化为内、外双转子系统,基于整体传递矩阵法,建立适用于两类电主轴的双转子耦合动力学模型^[1-4],如图 2(b)所示。新模型的主要难点在于内外转子耦合点传递矩阵的推导,满足耦合点协调条件的矩阵即为耦合矩阵,根据内外转子的力学平衡条件,可推导耦合处状态向量的传递关系,如图 2(c)所示。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12172088, 51635004, 11472078, 50775036, 50475073)

收稿日期:2025-01-08;修回日期:2025-03-07

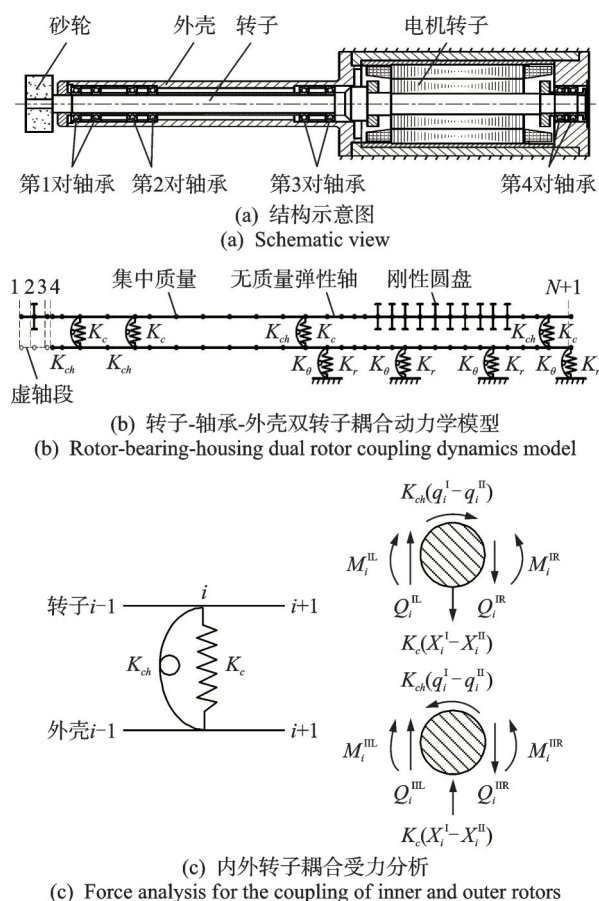


图2 复杂结构电主轴及其双转子耦合动力学模型

Fig.2 Complex motorized spindle and its dual rotor coupling dynamics model

考虑到高速工况下滚珠离心力与陀螺效应的影响,笔者基于Harris滚动轴承拟动力学理论,研究了滚动轴承动力学模型。高速电主轴一般选用成对接触球轴承作为支承方式,常见的配对方式为面对面、背靠背和串联配置。电主轴常用成对轴承配置方式如图3所示。成对接触球轴承可简化为线刚度和角刚度,笔者基于滚动轴承的分析理论,建立了成对轴承在3类配对方式下的5自由度准静力学模型^[5-6]。

基于滚动轴承模型与转子动力学模型,笔者建立了高速精密电主轴转子-轴承动力学模型,针对复杂结构滚动轴承电主轴转子动力学分析问题,编制了计算软件,为该类机床电主轴动力学计算、分析、设计与优化提供了新的理论与方法。笔者将理论成果应用于国内多款高速精密电主轴设计过程中,研制出大尺寸深孔内圆磨削电主轴(转速为9 000 r/min、加工长度 ≥ 500 mm、加工直径 ≥ 200 mm)、小直径深孔超高速磨削电主轴(转速为120 000 r/min、主轴回转精度 $< 1.0 \mu\text{m}$)及铁路轴承

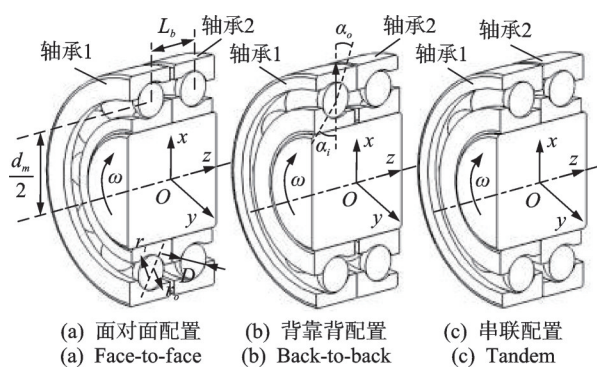


图3 电主轴常用成对轴承配置方式

Fig.3 Commonly-used configurations of pair bearing for motorized spindle

精密磨削电主轴(转速为9 000 r/min、额定功率为48 kW、径向静刚度为300 N/ μm 、轴端跳动小于2 μm)等。研发的滚动轴承电主轴产品如图4所示。上述产品解决了我国高端数控机床主轴功能部件的国产化难题。



(a) 大直径深孔磨削电主轴

(a) Motorized spindle for large-diameter deep-hole grinding



(b) 小直径深孔磨削电主轴

(b) Motorized spindle for small-diameter deep-hole grinding



(c) 铁路轴承精密磨削电主轴

(c) High-precision motorized spindle for grinding railway bearing

图4 研发的滚动轴承电主轴产品

Fig.4 The developed products of motorized spindle supported by rolling bearing

1.2 最佳预紧力电主轴振动控制技术

滚动轴承轴向预紧是提升电主轴动态性能的重要手段。目前,高速电主轴普遍采用恒压预紧,导致电主轴在低速加工时刚性偏小,而高速加工时轴承温升过高,严重制约了高速精密电主轴的使用性能。针对此问题,笔者提出了最佳预紧力电主轴振动控制技术^[7]。

最佳预紧力的计算思路如下:低速加工时,以主轴刚度为设计目标,轴承的疲劳寿命为约束条件;高速加工时,以滚动轴承的温升为约束条件。基于机械弹簧与液压系统混合作动机构,研制预紧力可控电主轴样机,如图5所示。试验结果表明:基于最佳预紧力电主轴振动控制技术,电主轴在低速段刚度大幅提高,在高速段轴承温升明显降低,使电主轴在整个工作转速内的使用性能显著提高。

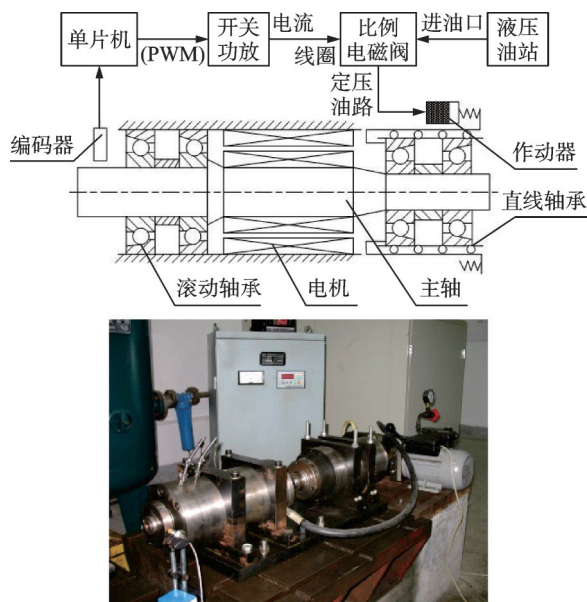


图5 最佳预紧力滚动轴承电主轴

Fig.5 The motorized spindle with an optimal preload on rolling bearing

2 滑动轴承电主轴转子动力学

2.1 空气轴承电主轴

静压空气轴承具有回转精度高、高速性能好等优点,空气轴承电主轴在硅片减薄用精密磨削、划片机与印刷电路板钻削等方面获得了广泛应用。笔者研发了图6所示的直径为300 mm硅片精密磨削电主轴,开展了空气轴承电主轴的转子动力学研究^[8-9],具体包括以下内容。

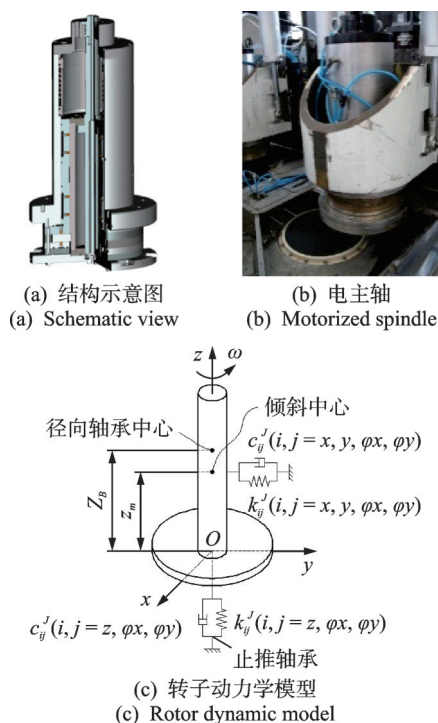


图6 硅片精密磨削电主轴

Fig.6 Motorized spindle for grinding the silicon wafer

2.1.1 空气轴承润滑理论建模

基于可压缩流体润滑理论,综合考虑电主轴转子的平移运动和倾斜运动,采用线性摄动法推导了径向空气轴承和止推空气轴承气体润滑静态雷诺方程;采用有限差分法和牛顿迭代法,推导了空气轴承静态参数的计算方法。

2.1.2 空气轴承电主轴转子动力学

基于刚体动力学理论,建立了空气轴承电主轴转子-轴承系统5自由度耦合动力学模型,提出了电主轴不平衡响应、磨削力激励响应与稳定性的计算方法。

笔者建立了空气轴承电主轴转子动力学方程,解决了大尺寸推力轴承与长径向轴承相互耦合的动力学建模难题,开发了自主知识产权的设计软件,为空气轴承电主轴转子动力学设计提供了技术手段。相关理论成果应用于直径为300 mm硅片空气轴承电主轴设计中,所研发的空气轴承电主轴已应用于我国自主研发的硅片精密制造生产线上。

2.2 水润滑静压轴承电主轴

2.2.1 水润滑动压螺旋槽轴承电主轴设计

传统的油润滑滑动轴承电主轴因油膜的剪切发热难以高速化,因此一些国际公司推出了水润滑静压轴承电主轴。但是,水润滑静压轴承电主轴必须

配套高压供水系统,附件成本高,严重制约了电主轴的工业应用。为突破此技术瓶颈,笔者提出了新型高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴,其结构示意图如图7所示。

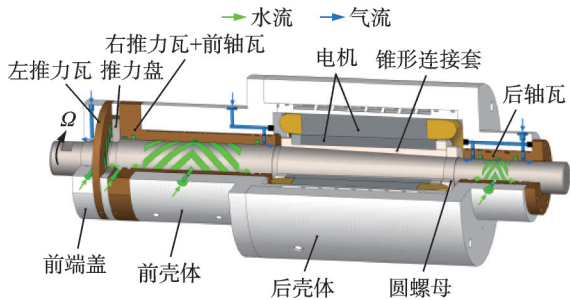


图7 水润滑动压螺旋槽轴承电主轴的结构示意

Fig.7 The schematic diagram of motorized spindle with the water-lubricated hydrodynamic spiral groove bearing

该型轴承电主轴设计理念如下:

1) 与主轴油相比,水具有比热大、黏度低、黏-温特性好等优点,选用水作为润滑介质,可以降低轴承功耗和温升,提升电主轴工作转速;

2) 与静压轴承相比,动压轴承不需要高压供水设备,动压轴承电主轴能大幅降低制造成本;

3) 动压螺旋槽轴承稳定性好;

4) 自泵效应与离心效应增加了轴承的流量,从而带走更多的热量,螺旋槽轴承电主轴温升较低。

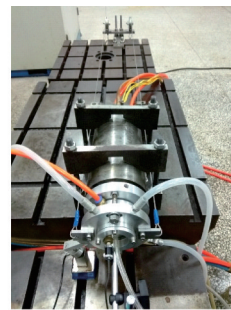
2.2.2 动压螺旋槽水轴承润滑建模与动静态特性分析

1) 理论分析。在高速工况下,水润滑轴承热效应凸显且易处于紊流状态,空化现象不可避免。经典润滑理论无法描述空化流润滑问题,因此笔者建立了以下紊流状态下水润滑轴承空化润滑模型^[10-19]:①基于两相流的双流体理论,建立空化流的润滑模型;②考虑高速工况下水润滑轴承的紊流和热效应,建立连续相液膜的广义雷诺方程和能量方程;③推导了高速水润滑轴承的热传导方程;④考虑气泡的体积分布,基于气泡的动量平衡条件,推导了气泡的运动方程;⑤引入气泡间的破碎和聚并演化过程,并考虑液相中气核的分布和筛核作用,推导了关于气泡尺寸分布演化的群体平衡方程。采用有限差分法联立求解上述方程,可以得到高速水润滑轴承的静动态特性参数。

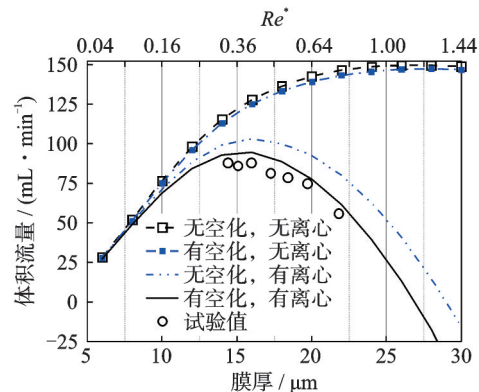
笔者首先将统计物理的输运方程引入到空化流润滑理论建模中,较好地解决了气泡尺寸随机变化的定量描述问题;其次,考虑多种效应(界面效应、紊

流效应、惯性效应、热效应和表面粗糙度效应),建立了高速水润滑动压轴承空化流的完整理论模型,为开展水润滑高速电主轴的转子动力学分析奠定理论基础。

2) 试验研究。笔者研制了如图8所示的水润滑动压螺旋槽推力轴承静态特性测试装置,解决了无级变速、高速非接触密封、轴向加载、轴承摩擦扭矩测试及水膜厚度测试等技术问题,并开展了泵入式与泵出式高速水润滑动压螺旋槽推力轴承的承载能力、轴向刚度、水膜厚度、摩擦功耗及轴承温升等静态特性测试。图中: $Re^* = \rho_1 \omega c_r^2 / \mu_{10}$ 。



(a) 测试装置
(a) Test rig

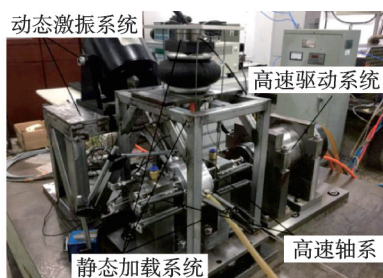


(b) 仿真与测试结果(工作转速为15 000 r/min)
(b) Simulation and test results (working speed of 15 000 r/min)

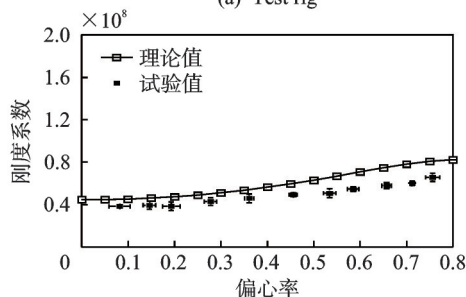
图8 水润滑动压螺旋槽推力轴承静态特性测试装置
Fig.8 The test rig for the static characteristics of water-lubricated hydrodynamic spiral groove thrust bearing

笔者研制的水润滑动压螺旋槽轴承动态参数测试装置如图9所示,解决了高速驱动与无级变速、转子支承轴承油气润滑、振动激励与振动信号测试等关键技术问题。本研究采用静动法开展了高速水润滑动压螺旋槽轴承动态参数(刚度系数、阻尼系数)的测试,探究了轴承型式和结构参数等对水润滑螺旋槽径向轴承动态性能的影响。

笔者研制的高速水润滑动压螺旋槽轴承空化测试装置如图10所示,采用玻璃制造轴瓦和高速相机

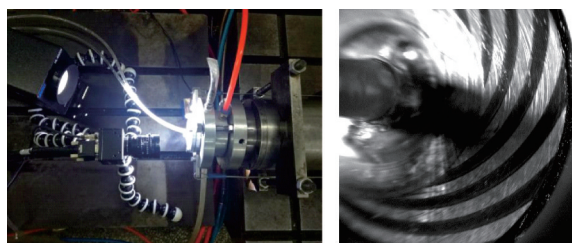


(a) 测试装置
(a) Test rig

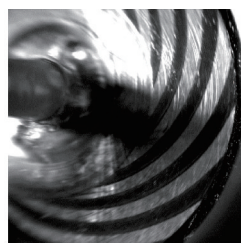


(b) 仿真与测试结果 (工作转速为15 000 r/min)
(b) Simulation and test results (working speed of 15 000 r/min)

图9 水润滑动压螺旋槽轴承动态参数测试装置
Fig.9 The test rig for the dynamic characteristics of water-lubricated hydrodynamic spiral groove journal bearing



(a) 测试装置
(a) Test rig



(b) 测试结果
(b) Test result

图10 高速水润滑动压螺旋槽轴承空化测试装置

Fig.10 The test rig for the cavitation observation of high-speed water-lubricated hydrodynamic spiral groove thrust bearing

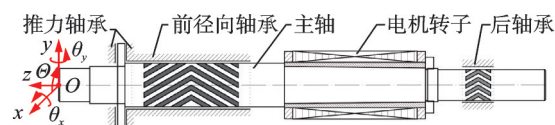
成像,解决了轴承空化气泡的采集问题。本研究基于图像处理技术,提出了轴承空化气泡测试方法,开展了动压螺旋槽推力轴承在高速下的空化观测试验。

2.2.3 水润滑动压螺旋槽轴承电主轴转子动力学

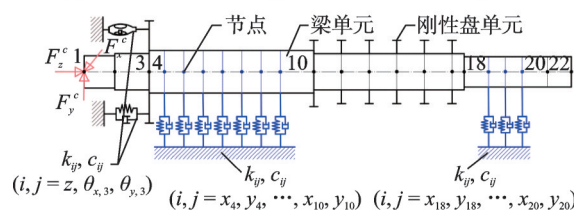
根据机床主轴动态设计准则,其最高工作转速不超过一阶临界转速的70%,因此需要开展高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴柔性转子动力学特性分析,同时也要开展电主轴刚性转子动力学分析,以满足主轴运行稳定及刚度性能要求。

1) 电主轴柔性转子动力学特性分析。为精确描述高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴转子动力学特性,笔者集成了大长径比人字槽径向轴承模型、闭式螺旋槽推力轴承模型和柔性转子动力学模型,建

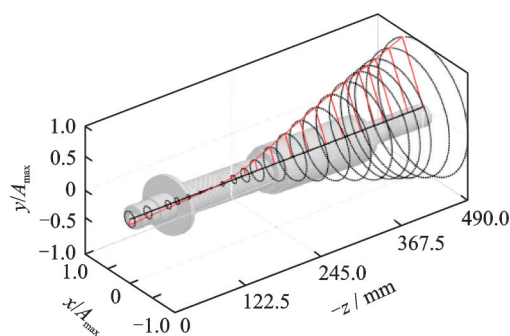
立了新型电主轴柔性转子-轴承系统动力学模型^[20-21],如图11所示。首先,为有效表征大长径比径向轴承支承特性,提出柔性轴颈假设和轴承离散化思想,开发了普适性的、与有限元转子模型兼容的分布式径向轴承模型;其次,考虑倾斜效应,建立闭式螺旋槽推力轴承在3自由度下的润滑模型。所建立的转子-轴承系统动力学有限元模型可用于不同外部载荷作用下电主轴动力学特性分析,同时采用摄动法,获得径向轴承和推力轴承刚度与阻尼系数,建立了考虑推力轴承抗倾覆效应的电主轴柔性转子-轴承的传递矩阵动力学模型。



(a) 电主轴柔性转子-轴承系统
(a) Flexible rotor-bearing system of motorized spindle



(b) 转子动力学模型
(b) Rotor dynamic model



(c) 一阶临界转速及其主振型
(c) 1st critical speed and its corresponding mode

图11 电主轴柔性转子-轴承系统动力学模型

Fig.11 The flexible rotor-bearing dynamic model for the motorized spindle

2) 电主轴刚性转子动力学特性分析。本研究基于牛顿第二运动定律和动量矩定理,考虑水润滑轴承的平动、转动与平动-转动耦合动态特性系数,建立高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴刚性转子-轴承系统动力学模型,如图12所示。笔者提出了电主轴转子不平衡响应、切削力响应和稳定性的计算方法,分析计算了电主轴刚性转子固有频率及其主振型,并开展了电主轴在切削力作用下的瞬态响应计算。

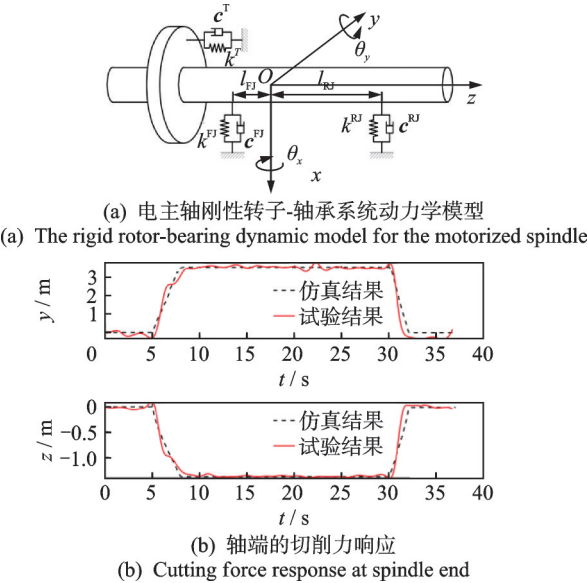


图 12 电主轴刚性转子-轴承系统动力学模型
Fig.12 The rigid dynamic model of rotor-bearing system for the motorized spindle

笔者考虑到轴向动压螺旋槽轴承的抗倾覆能力,建立了高速水润滑轴承电主轴柔性转子动力学模型;考虑到径向与轴向轴承的相互耦合效应,建立了高速水润滑轴承电主轴5自由度刚性转子动力学模型。本研究根据机床主轴的动态设计准则,提出了电主轴转子动力学设计方法^[22-23]。

2.2.4 高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴样机与试验

基于提出的高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴转子动力学设计理论与方法,结合电主轴结构设计、轴承密封、高速驱动及热设计等方面的技术积累,笔者提出了高速动压轴承电主轴刚度的定义、计算与测试方法,设计并试制了转速为25 000 r/min、功率为20 kW的水润滑动压螺旋槽轴承电主轴试验样机^[24-25],如图13所示。电主轴样机测试结果表明:所建立的水润滑动压螺旋槽轴承电主轴转子动力学模



图 13 高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴试验样机
Fig.13 The test prototype of the motorized spindle with water-lubricated hydrodynamic spiral groove bearing

型精度高,动态稳定性和轴端刚性好,研发的动压螺旋槽轴承摩擦功耗低、流量大及温升低。

2.3 水润滑轴承与滚动轴承组合支承主轴

端面切削是一类常用的加工方法。目前,纯滚动轴承大尺寸端面加工主轴回转精度偏低,而油润滑静压轴承主轴摩擦功耗大、转速偏低。为此,笔者提出了水润滑静压推力轴承与滚动轴承组合支承主轴^[26-27],旨在获得一类集高刚性、高精度、低成本及低功耗等优良性能于一体的新型端面加工机床主轴单元。水润滑静压推力轴承与滚动轴承组合支承主轴如图14所示。

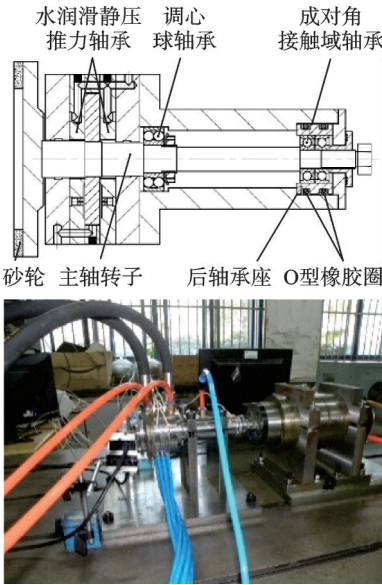


图 14 水润滑静压推力轴承与滚动轴承组合支承主轴
Fig.14 The spindle supported by a water-lubricated hydrostatic spiral groove thrust bearing and rolling bearings

2.3.1 主轴刚性转子动力学

首先,基于牛顿第二定律和刚体定轴转动定律,建立了组合支承主轴5自由度刚体动力学模型;其次,推导了调心球轴承和水润滑静压推力轴承动力特性系数的计算方法;最后,分析了切削力作用下组合支承端面主轴的刚性转子动力学特性,并基于灵敏度分析法,揭示出主要参数对主轴刚性转子动力学特性参数的影响规律。

2.3.2 主轴柔性转子动力学

首先,考虑到水润滑静压推力轴承倾斜效应,推导了改进传递矩阵,建立了组合支承端面主轴柔性转子动力学模型;其次,分析了组合支承端面主轴的柔性转子动力学特性,揭示了主要参数对主轴柔性转子动力学特性参数的影响规律;最后,研制了组合

支承端面主轴动态特性参数测试装置,并测试了主轴端面轴向振动量。

研究结果表明,新型组合支承端面磨削主轴具有轴向承载能力大、回转精度高、摩擦功耗低及使用寿命长等优点。例如,对于砂轮直径为100 mm的主轴,可选用直径为70 mm的水润滑静压推力轴承、内径为15 mm的调心球轴承和内径为12 mm的成对角接触球轴承,实测主轴轴向刚度可达228 N/ μm ,其在6 000 r/min转速下的摩擦功耗仅为66 W。

3 结 论

1) 面向高性能机床电主轴动态设计的需求,建立了滚动轴承电主轴、流体润滑轴承电主轴与组合支承主轴转子动力学模型及其理论体系,为机床电主轴转子动力学设计提供了理论与方法。

2) 提出了高速水润滑动压螺旋槽轴承电主轴、水润滑推力静压轴承与滚动轴承组合支承电主轴的原理。

3) 提出了流体润滑轴承电主轴轴端刚度测试方法,研制了电主轴非接触永磁加载系统,为电主轴动态性能测试提供了硬件保障。

4) 基于理论成果,先后完成高速内圆磨削电主轴、高刚性铁路轴承电主轴、高精度硅片精密减薄精密电主轴及超高速PCB钻削高速电主轴等设计,所研发的电主轴在国家重大数控装备中获得工程应用,解决了主轴功能部件的国产化难题。

参 考 文 献

- [1] 蒋书运,林圣业. 高速电主轴转子-轴承-外壳系统动力学特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 26-35.
JIANG Shuyun, LIN Shengye. Study on dynamic characteristics of motorized spindle rotor-bearing-housing system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 26-35. (in Chinese)
- [2] JIANG S Y, ZHEN S F. Dynamic design of a high speed motorized spindle-bearing system [J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of ASME, 2010(131): 034501.
- [3] JIANG S Y, ZHEN S F. A modeling approach for analysis and improvement of spindle-drawbar-bearing assembly dynamics [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010(50): 131-142.
- [4] LIN S Y, JIANG S Y. Dynamic characteristics of motorized spindle with tandem duplex angular contact ball bearings [J]. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of ASME, 2019, 141(12): 061004.
- [5] JIANG S Y, MAO H B. Investigation of the high speed rolling bearing temperature rise with oil-air lubrication [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2011(133): 021101.
- [6] LIN S Y, JIANG S Y. Study of the stiffness matrix of preloaded duplex angular contact ball bearings [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2019, 141(3): 032204.
- [7] JIANG S Y, MAO H B. Investigation of variable optimum preload for a machine tool spindle [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010(50): 19-28.
- [8] XU C D, JIANG S Y. Dynamic analysis of a motorized spindle with externally pressurized air bearings [J]. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of ASME, 2015(137): 041001.
- [9] JIANG S Y, LIN S Y, XU C D. Static and dynamic characteristics of externally pressurized porous gas journal bearing with 4 degrees of freedom [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2018, 140(1): 011702.
- [10] LIN X H, JIANG S Y, ZHANG C B, et al. Thermohydrodynamic analysis of high speed water-lubricated spiral groove thrust bearing using cavitating flow model [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2018, 140(9): 011703.
- [11] LIN X H, JIANG S Y, ZHANG C B, et al. Thermohydrodynamic analysis of high speed water-lubricated spiral groove thrust bearing considering effects of cavitation, inertia and turbulence [J]. Tribology International, 2018, 119(1): 645-658.
- [12] ZHANG S W, JIANG S Y, LIN X H. comparative study on dynamic characteristics of double-pad inwardly and outwardly pumping water-lubricated spiral-groove thrust bearings [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2020, 142(9): 091803.
- [13] LIN X H, WANG R Q, ZHANG S W, et al. Study of cavitation bubbles evolution for high-speed water-lubricated spiral groove thrust bearings [J]. Journal of Tribology, Transactions of ASME, 2019, 141(5): 051703.
- [14] LIN X H, WANG R Q, ZHANG S W, et al. Study on

- dynamic characteristics for high speed water-lubricated spiral groove thrust bearing considering cavitating effect [J]. *Tribology International*, 2020(143): 106022.
- [15] ZHANG S W, JIANG S Y, LIN X H. Static and dynamic characteristics of high-speed water-lubricated spiral-groove thrust bearing considering cavitating and centrifugal effects[J]. *Tribology International*, 2020(145):106159.
- [16] JIANG S Y, LIU P F, LIN X H. Study on static characteristics of water-lubricated textured spiral groove thrust bearing based on laminar cavitating flow lubrication model[J]. *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, 2022, 144(4): 041803.
- [17] ZHANG H, JIANG S Y, LIN X H. Study of dynamic characteristics of water-lubricated journal bearings using thermohydrodynamic cavitating lubrication model [J]. *Tribology Transaction*, 2023, 66(2):381-397.
- [18] ZHANG S W, JIANG S Y. Comparative study on static characteristics of double-pad inwardly and outwardly pumping water-lubricated spiral-groove thrust bearings [J]. *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, 2021, 143(10): 104501.
- [19] ZHANG H, JIANG S Y, LIN X H. Static characteristics of high speed water-lubricated journal bearing considering turbulence and cavitation effects[J]. *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, 2023, 145(12): 124101.
- [20] HUANG X, XU G, JIANG S Y. Static characteristics of water-lubricated hydrodynamic spiral-groove journal and thrust bearings for motorized spindle[J]. *Journal of Tribology, Transactions of ASME*, 2023, 145(12): 124501.
- [21] HUANG X, XU G, JIANG S Y. Study on rotor-bearing dynamic performance of a novel motorized spindle supported by water-lubricated hydrodynamic spiral grooved bearings [J]. *Tribology Transactions*, 2024, 67(4): 831-845.
- [22] FENG H H, JIANG S Y. Dynamics of a motorized spindle supported on water-lubricated bearings[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(3): 459-472.
- [23] FENG H H, JIANG S Y. Dynamic analysis of water-lubricated motorized spindle considering tilting effect of thrust bearing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231(10):3780-3790.
- [24] XU G, HUANG X, JIANG S Y. Study on thermal behavior of an improved motorized spindle with water-lubricated hydrodynamic spiral groove bearings[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 135(10):1697-1712.
- [25] XU G, HUANG X, JIANG S Y. An experimental and theoretical approach for stiffness of machine tool spindle with fluid bearings [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 128(1/2): 167-180.
- [26] JIANG S Y, LIN S Y, LIU F K. Thermal behavior of an improved face-grinding spindle: water-lubricated hydrostatic thrust bearing decreases temperature rise and increases axial stiffness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 124(11/12): 4329-4345.
- [27] LIN S Y, JIANG S Y. Rotordynamics of an improved face-grinding spindle: rotational stiffness of thrust bearing increases radial stiffness of spindle [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of ASME*, 2022, 144(8):84502.



作者简介:蒋书运,男,1966年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为转子动力学、摩擦学及高速加工机床。主持国家自然科学基金重点项目、国家高技术研究发展计划“八六三”计划项目、国家科技重大专项课题、国家科技支撑计划课题及省部级项目等40余项。发表SCI收录论文120篇,连续入选爱思唯尔(Elsevier)中国高被引学者、美国斯坦福大学全球前2%顶尖科学家榜单。授权国家发明专利70余项,荣获江苏省科学技术一等奖1项、教育部科技进步二等奖1项和教育部技术发明二等奖1项。入选教育部新世纪优秀人才支持计划、江苏省六大人才高峰项目(A类)等。E-mail:jiangshy@seu.edu.cn