

精密卧式加工中心正向设计 关键技术研究进展*

张大卫, 高卫国

(天津大学机械工程学院装备设计与制造技术天津市重点实验室, 天津 300355)

[摘要] 从精密卧式加工中心正向设计方法和数字化设计软件、几何精度设计、静动刚度设计、阻尼设计、热平衡设计与温度场主动控制、切削动力学建模与仿真、主轴单元设计技术等方面, 综述了有关精密卧式加工中心设计技术的国内外发展现状, 并对其未来发展进行了相关探讨。

关键词: 精密卧式加工中心; 几何精度; 静刚度; 热平衡设计

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.034



张大卫

教授, 工学博士, 主要从事数控机床结构动态设计、超精密定位技术等方面的教学研究工作。先后主持国家和省、市、部委自然科学基金项目、数控机床专项等课题 30 余项, 申请国家发明专利 20 余项, 软件著作权 2 项。发表论文 150 余篇, 其中 SCI 收录 50 余篇。

精密卧式加工中心是制造精密机床和其他高精度机器, 保证国防和尖端工业发展的战略性基础装备, 体现了一个国家先进制造技术的综合水平。精密卧式加工中心适用于箱体类、盘类、板件及模具类等复杂零件的精密加工, 是军工、航天、航空、刀具、模具及机器制造业等精密零件加工的必需设备。

了解精密卧式加工中心正向设计关键技术国内外的研究进展, 研究和掌握精密卧式加工中心正向设计关键技术, 开发具有国际先进水平的精密卧式加工中心, 形成以用户需求为出发点的自主研发体系和技术辐射能力, 引领高档机床设计制造技术的发展, 对实现我国高档数控机床的技术跨越具有重大意义。

国内研究现状

1 正向设计方法和数字化软件工具

在机床结构设计过程中, 尚无系统的理论方法支撑, 目前机床结构设计主要依靠类比, 这种基于试凑的设

计过程导致设计反复、周期长。在设计软件工具方面, 商用 CAD/CAE 软件未提供机床设计专用模块, 机床设计人员使用通用模块进行机床设计时, 部分时间拘泥于细节, 设计效率低下。

针对上述问题, 国内外学者提出了诸多设计方法和系统来集成设计知识和工具。Lee 等^[1]提出一种用于机床设计的推理机制, 使得机床设计时的推理过程, 尤其针对含有大量知识的推理变得高效。Liu 等^[2]提出用一种以知识为核心的机床设计过程管理框架来开发 CNC 机床产品。Park 等^[3]开发了可实现机床快速设计与优化的集成设计系统。Myon 等^[4]基于机床设计知识开发了一种加工中心智能设计软件系统。Maglie^[5]开发了一套集成机床设计仿真平台, 旨在实现设计过程中机床结构的实时仿真分析。

天津大学基于最新的整机设计理论与方法, 提出机床正向设计的思想。首先, 通过构建包含骨架模型、

* 基金项目: 863 计划重大课题“箱体类精密工作母机共性前沿技术平台”(2012AA040701); 高档数控机床与基础制造装备科技重大专项“数控机床误差测量分析与补偿技术”(2015ZX04005001)。

刚度模型和动力学模型^[6-7]的拓扑结构模型库,集成机床设计知识,用于初始阶段的机床整机概略参数设计及刚度^[6]与质量匹配设计^[8];并以此作为目标和约束,为后期的标准件选型、结构设计和优化提供指导。其次,搭建支撑机床结构设计的标准件数据库^[9-10]、结构件模型库^[11]和筋板库,帮助工程师通过较少的交互操作实现标准件和结构件的高效选型与设计。最后,基于分析特征模型^[12]和映射技术实现CAD/CAE软件的无缝集成,进而实现机床结构的自动化FE建模和分析;并以iSIGHT为平台进行CAD/CAE集成,实现结构件的优化设计^[13]。在上述理论方法基础上,基于商用软件PTC Creo、ANSYS/SAMCEF和iSIGHT开发了精密卧式加工中心专用数字化设计软件系统,系统结构如图1所示。该系统具备设计导航功能,包括拓扑结构数据库、标准零部件数据库、结合面参数数据库等,可支持精密卧式加工中心整机运动学、动力学建模与多领域仿真/优化设计。

机床设计活动涉及机床相关领域的各个方面,设计知识繁杂,具备管理和应用机床设计领域复杂知识的专家系统将是未来发展的主要方向。

2 整机几何精度设计

几何精度是精密卧式加工中心重要的性能指标之一。精度设计是保证机床加工精度的重要前提,可通过合理的机床设计、零部件加工、装配来消除或减少误差源,保证机床的基础制造精度。建立刀具-工件相对位姿误差与系统几何误差源之间的映射关系——误差模型,是实现精度设计的重要前提。

在数控机床误差建模方面,以多体系统理论结合齐次坐标变换为基础的误差建模与分析方法已得到普遍应用。基于该方法,天津大学^[14-15]、国防科技大学^[16]和上海交通大学^[17]

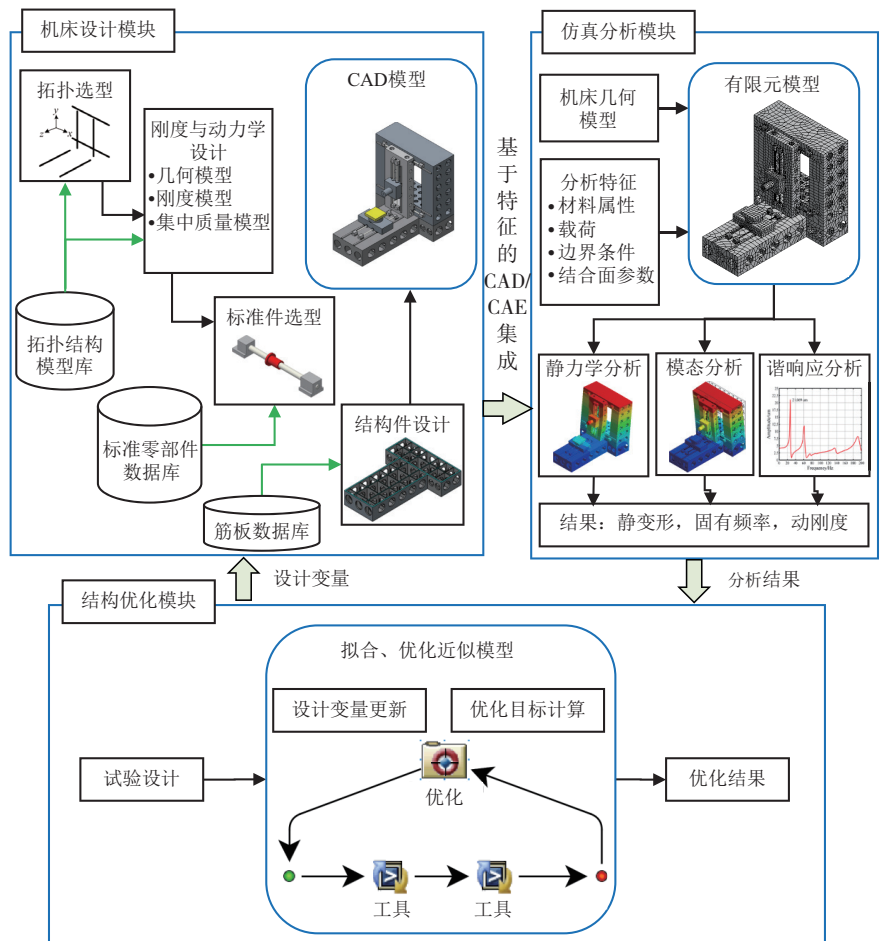


图1 精密机床数字化设计软件系统结构

Fig.1 Architecture of the digital design software system for precision machine tool

等在机床误差建模、误差分析和误差补偿等方面取得了一系列研究进展。然而该建模方法不足之处在于无法有效分离影响机床可补偿与不可补偿位姿误差的几何误差源。为此,天津大学提出一种基于旋量理论的误差建模方法(如图2所示)^[18],有效解决了这一问题,为针对不同类型误差元分别采取适当手段改善机床精度提供了理论依据。

由于各几何误差源对整机精度的影响规律不同,同时其控制难易程度也不同,故在满足整机精度设计指标的前提下,如何合理分配各误差源的允许变动范围,是数控机床几何精度设计所需解决的关键问题。Parkinson从统计公差的角度出发,提出了统计公差综合的观点,认

为尺寸分布可从加工过程产生的样品数据中得到,并以制造成本作为目标函数,形成了一套程序化的优化算法^[19]。Lee和Woo^[20-21]、刘玉生^[22]将公差视为满足某一分布规律的随机变量,且将加工成本作为最终优化目标,将装配和设计的要求作为约束条件的公差分配,转化为多元有约束非线性规划问题。该模型广泛应用于公差分配过程中,但仍难以考虑特殊的装配要求。目前为止,尚未形成体系完善的、可有效指导机床零部件加工装配的数控机床几何精度设计理论,该方向将成为数控机床设计理论中的重点和难点问题之一。

3 整机结构静动刚度设计

3.1 整机静刚度匹配设计

静刚度是精密卧式加工中心的

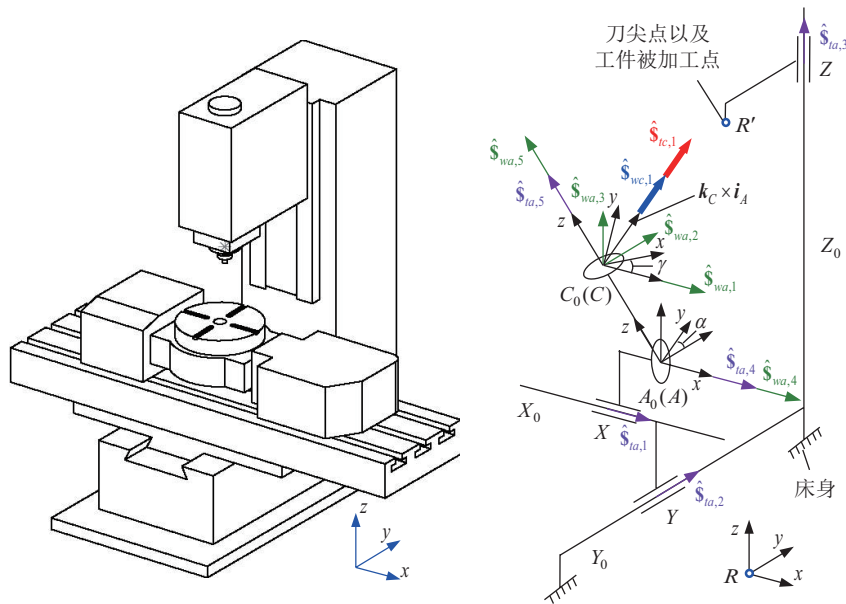


图2 基于旋量理论的数控机床几何误差建模方法

Fig.2 Geometric error modeling of CNC machine tool based on screw theory

重要指标之一,对加工效率、加工精度和表面加工质量有重要影响。国内外学者针对主轴和刀具系统静刚度对工件加工质量的影响^[23-24]、机床整机静刚度对加工变形误差的影响^[25-26]、机床整机静刚度建模^[27-28]等方面开展了大量研究。主要研究思路是在构建机床三维模型后进行建模、仿真和试验测试,侧重于对已有机床的静刚度分析,并没有从机床设计的角度建立整机静刚度模型。

目前,在机床部件和整机设计阶段,尚无法准确获知合理的整机和部件静刚度值。针对此问题,天津大学提出了一种整机静刚度正向设计的方法^[6]。在设计初期,从机床的概念模型出发,建立整机静刚度与各部件静刚度间的映射关系模型;依据此映射关系,以满足用户要求的整机静刚度为目标,合理匹配各部件静刚度目标值;并用各部件的静刚度目标值指导结构件详细设计与功能部件选型,从而在设计阶段保证整机静刚度满足设计要求。

3.2 支撑点布局优化设计

精密卧式加工中心床身支撑点的布局对其性能有着重要影响,合理

的支撑点布局可保障机床具有良好的调平性、稳定性、精度保持性和抗干扰性等。

国内外学者就支撑点布局对整机静态性能的影响^[29-30]、支撑区域接触刚度的仿真和测试^[31-32]、支撑点布局的优化设计^[33-35]等方面开展了相关研究。目前,对支撑点布局的优化设计主要是多方案对比优化设计或在限制支撑点数量、支撑区域的条件下进行优化设计。由于缺乏普适性的支撑点布局优化设计方法,优化设计的工作量较大,支撑点布局的优化设计尚未在机床制造企业广泛应用。精密卧式加工中心床身支撑点布局的发展趋势是在保证床身静态性能和支撑静定的最低3点支撑要求下,支撑方式越简单越好^[36]。

天津大学提出了精密卧式加工中心T型床身在3点支撑布局时的床身结构优化设计方法^[37],实现了精密卧式加工中心T型床身3点支撑布局 and 床身结构的优化设计^[38],如图3所示。

3.3 整机动刚度匹配设计

精密卧式加工中心在切削载荷和驱动机构的非平衡载荷等激励作

用下产生振动,对加工精度产生严重影响。整机动刚度对精密卧式加工中心的抗振性和加工精度有着较大影响,国内外学者针对机床整机动特性问题开展了大量研究。Yigit等^[39]基于集中参数法建立机床整机动力学模型,并对整机结构动态性能进行评估,取得了较为理想的计算结果。Yoshimura等^[40]利用分布质量法,忽略机床结合部的影响,建立了单柱刨铣床动力学模型,从能量平衡角度对机床结构进行了优化设计。有限元方法由于考虑了结构件的变形情况,已经广泛应用于机床结构的动态性能预估^[41-42]。Patrick^[43]等对机床结构进行有限元建模与动力学性能分析,总结出包括质量参数在内的全程参数优化设计问题,对机床结构进行拓扑优化设计,全面分析了变量参数优化设计在机床结构动态优化设计中的应用。Kroll等^[44]基于经济性与实用性考虑,从降低生产制造成本方向出发,利用有限元法与参数优化方法,对机床结构件进行轻量化设计,提高机床生产效率。付俊涛^[45]等考虑到机床整体结构中横梁承担刀架重量、传递切削载荷,对机床结构加工精度影响较大等因素,提出了一种基于有限元法的结构分析和动态优化设计方法,对横梁进行了轻量化设计研究。

上述研究侧重于对已有机床的动力学分析与局部的动特性优化,如何在设计阶段进行各结构部件的静动刚度分配和质量分布匹配,以满足预期的整机静动刚度,是精密卧式加工中心结构动态设计的研究重点和方向。

4 整机系统阻尼设计

阻尼是机床结构动态特性分析的重要参数之一,对机床的振动和加工精度有着极大的影响。数控机床存在多种阻尼形式,包括各结构件的材料阻尼以及螺栓、导轨滑块、丝杠螺母、轴承等处产生的结合面阻尼。

在机床结合面的阻尼特性方面,堤正臣^[46]基于结合面动态试验提出了结合面切向周期性的迟滞变形是结合面阻尼产生的主要原因。刘晓平、徐燕申等^[47-48]将模态分析和有限元法相结合,提出了基于实测传递函数矩阵来识别结合面阻尼参数的方法,使其识别过程简便并具有工程实用价值。黄玉美等对结合面静、动态特性理论及其参数识别进行了深入研究,提出结合面阻尼机理的本质是结合面间的微观滑移阻尼耗能的观点,并基于分形理论提出了一种获取结合面法向和切向阻尼参数的方法^[49-51]。

在机床材料阻尼方面,20世纪70年代中期,瑞士和德国首先对树脂混凝土在机床中的使用进行了研究,两国的机床制造企业在制造高精度磨床和高速铣床时首次采用高阻尼性能的环氧树脂混凝土材料制造床身和一些主要基础大件,大大改善了机床动态特性。20世纪80年代中期,北京机床研究所、同济大学进行了相似材料在机床上应用的研究。除了改变机床材料本身,通过粘贴、喷涂或填充等手段在结构件表面或内部附着一些高阻尼材料来改变机床阻尼成为近年来国内外研究的另一热点。韩国学者^[52-53]在这方面做了大量研究工作,将复合材料或粘弹阻尼

材料粘贴在磨床或加工中心的立柱、主轴箱等关键部件表面,有效改善了机床动态性能。

虽然国内外学者对机床阻尼做了大量的研究,但仍有诸多问题有待进一步深入研究,如结合面的阻尼机理尚未完全明确,需进一步解释和完善;在采用新型材料制造机床时,如何平衡机床静动热和精度等特性;在机床结构件上添加高阻尼材料时,添加位置和形状的最优化问题等。

5 整机热平衡设计与温度场主动控制

5.1 整机热平衡设计

机床的精度越高,热误差的影响越大,所以减少热误差是提高精密机床加工精度的关键。减少热误差的方法主要有3种:温度控制、热稳定性设计和热误差补偿^[54]。

由于测温点的局限性以及热变形测量的复杂性,需要建立等效的机床有限元分析模型。孙振宏^[55]等综合考虑主轴转速、预紧力、冷却液流量、温度变化等工况对电主轴发热量的影响,建立电主轴生热模型,进行了电主轴的温升、变形和应力测试等热特性试验。Liu等^[56]考虑不同进给速度、冷却液温度及速度,并结合试验分析对进给系统建模及仿真。Mian等^[57]分析了机床接触热阻以及环境对流换热系数理论,建立机床的整机热特性仿真模型,并通过环境温度的

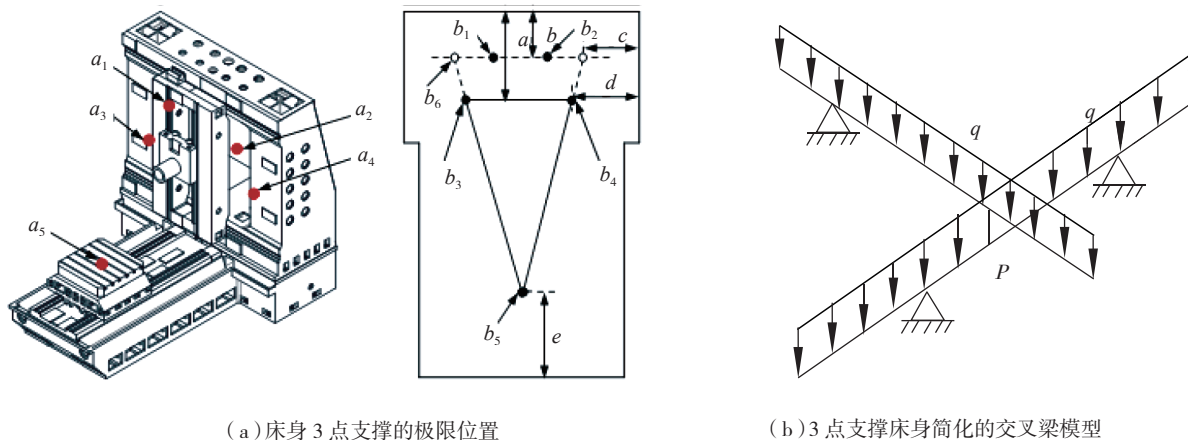
试验验证该方法的正确性。

针对整机的热特性建模以及仿真分析,主要问题在于确定机床的热边界条件,要研究不同的环境温度对机床热误差的影响,机床内生热源的隔热以及热传递控制方法,同时需要研究不同工况下各热源向机床大件的热量传递大小以及规律。张大卫等^[58]提出了一种基于整机的热特性仿真分析结果进行机床结构热误差与工作空间热误差关系建模的方法。

针对机床的热源不对称性,基于有限元模型,对机床的结构进行优化分析,可减少热源的不对称性导致的机床热误差。Mori等^[59]采用有限元方法针对主轴箱进行尺寸优化设计,有效降低了机床的热误差。

5.2 整机与核心部件温度场主动控制

内外热源共同作用而产生的机床热变形误差是影响精密卧式加工中心精度和精度稳定性的重要因素。作为一种常见的动态热平衡/热误差控制方法,循环冷却液换热已被广泛采用。其基本思想是通过对精密卧式加工中心整机/关键功能部件内部冷却循环液供液工况的调控,减少生热部件和环境及结构的热交换^[60-61],以保持精密卧式加工中心结构温度场的均恒性,从而降低其结构热变形^[62]。然而,目前循环冷却装备多采用分流阀等实现多回路的并行循环换热,这



(a) 床身3点支撑的极限位置

(b) 3点支撑床身简化的交叉梁模型

图3 精密卧式加工中心的3点支撑布局设计

Fig.3 Layout design of 3-points supporting of precision horizontal machine tool

使得对精密卧式加工中心结构不同部位的温度场控制实行了开环/同一化控制策略,可部分带走精密卧式加工中心内生热源生热量,但其不足之处在于开环/同一化的控温模式难以适应精密加工热态工况变化对温控能力差异化的动态时变需求,由此导致了精密卧式加工中心启动-热稳定过程周期长,温控能力不均衡等问题。

为解决上述问题,天津大学提出了一种多回路差异化主动温控方法^[63-64],开发了适用于精密机床温度场主动控制的分层独立差异化主动温控装置^[65]。基于该装置搭建了包含结构温度监测的精密卧式加工中心温度场闭环主动控制试验平台(如图4所示),对精密卧式加工中心温度场闭环自调节控制策略进行了初步探索,取得了一定效果。

基于温度场闭环自适应调控的热态特性主动控制模式有望成为精密加工装备温度场控制方式发展的主要趋势。与传统的热误差补偿方法相比,热态特性主动控制方式具有不依赖于数控系统、可同步抑制多项热误差等优势。热态特性主动控制方法的研究将在一定程度上降低精密加工对恒温环境的依赖性,对我国

加工装备设计/制造水平的提升及精密加工成本的降低均具有重要的理论意义和工程价值。

6 切削动力学建模与仿真

在实际切削过程中,自激振动(颤振)对加工系统的影响很大。切削颤振形成的原因比较复杂,自1950年代后期Tobias^[66]、Koenigsberger^[67]等开创性地进行机床再生型颤振研究以来,诸多学者对切削颤振机理、数学模型、稳定性求解、颤振抑制等问题开展了持续研究,提出了多种切削颤振理论。Merritt^[68]基于反馈控制理论提出了基于再生型颤振效应的稳定性叶瓣图。随后,诸多学者通过对切削过程进行动力学建模,提出了不同的稳定性求解方法,其中具有代表性的有直接数值求解法、零阶近似频域法、时域半离散法、时域全离散法以及试验法等^[69-73]。结合不同的稳定性求解方法,绘制的稳定叶瓣图对于切削参数优选和提高加工效率具有指导意义。目前,切削稳定性求解算法依然是切削颤振领域内的一个热点问题和具有代表性的研究方向。

近年来,依据用户需求,考虑切削工艺的机床整机设计方法,即机床设计-加工的集成设计方法逐渐盛

行。该方法由Mohit^[74]以及Zulaka^[75]等相继提出,其核心思想为:将切削稳定性与机床机构设计结合起来,实现了机床设计与加工的统一,现已形成一个全新的机床设计理念。天津大学以精密卧式加工中心为研究对象,结合实际切削工艺要求,对机床整个工作空间位置的铣削稳定性进行了快速评估,从而为机床结构的优化提供了理论和方法基础^[76],如图5所示。在未来的一段时期内,机床设计-加工的集成设计方法将引领机床设计及绿色制造的潮流,具有巨大研究潜力和社会价值。

7 主轴单元设计技术

高速精密主轴是精密卧式加工中心的核功能部件,其静、动态特性对整机的影响至关重要,因此主轴的静、动态设计是主轴研发过程中的一个重要环节^[77]。主轴的跨距、轴承配组形式和预紧力是对主轴结构进行动态特性优化设计的主要因素。主轴的动态特性优化设计是实物建模、物理建模、测试验证、模型优化等的反复拟合过程,应该贯穿设计的每一个阶段,而不是结构设计的最后验证^[78]。

主轴转子支撑技术是高速精密主轴系统的一项关键技术。主轴的

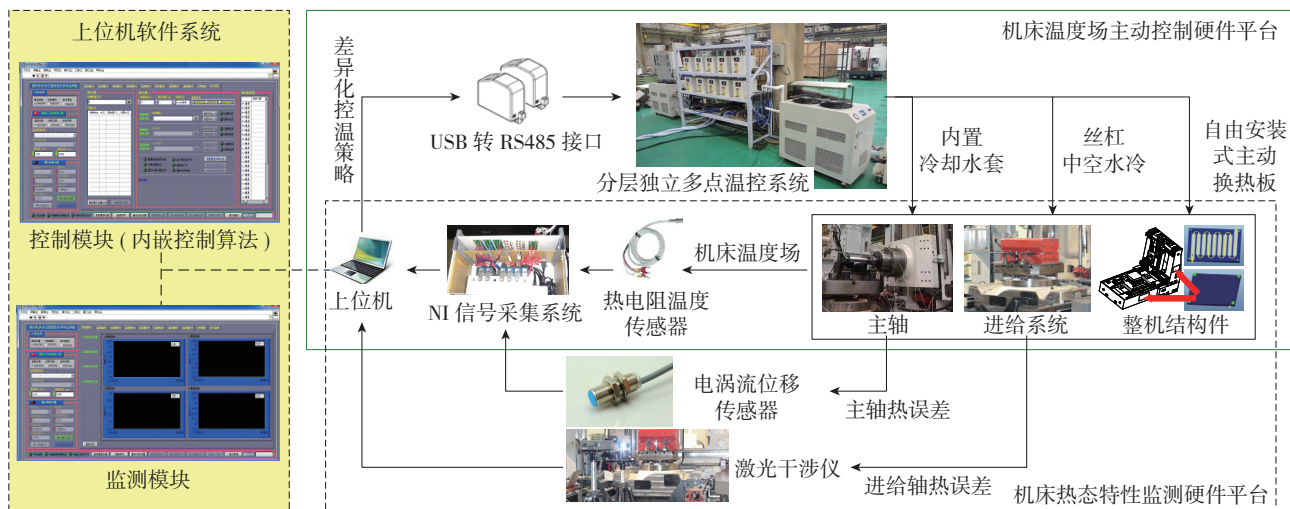


图4 精密卧式加工中心温度场闭环主动控制试验平台

Fig.4 Platform of closed active control for temperature field of precision horizontal machine tool

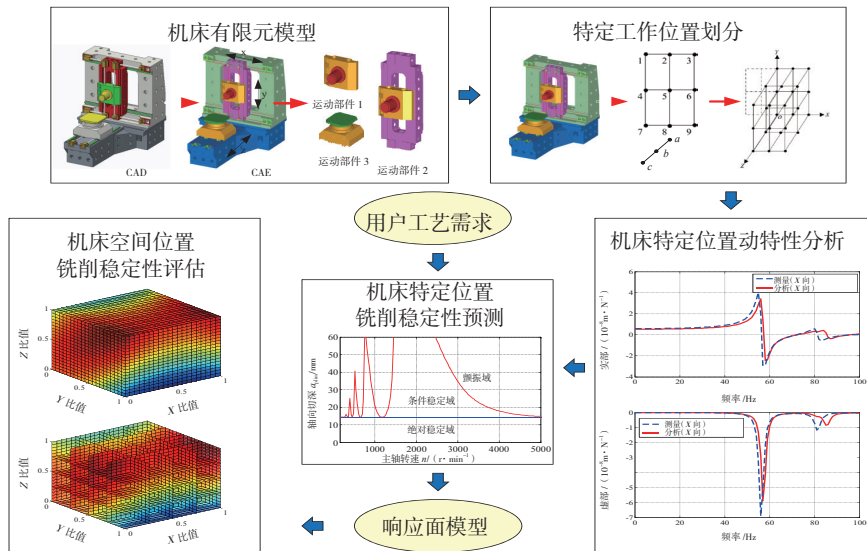


图5 基于响应面模型的机床空间铣削稳定性快速评估方法

Fig.5 Rapid evaluation method of position-dependent milling stability of machine tool based on response surface model

支撑必须满足高速、高回转精度和高刚度的要求。目前,国内外高速精密主轴所采用的轴承有滚动轴承、液体滑动轴承、气体轴承和磁悬浮轴承。相对于液体滑动轴承和气体轴承,角接触球轴承具有低成本、较高的刚度和精度,且能同时承受轴向和径向载荷的优点,因此仍然是大多数高速主轴制造商的首选。然而,角接触球轴承的刚度随着承受的载荷和转速呈非线性变化,为了提高轴承的刚度、旋转精度及使用寿命等,主轴轴承组需要进行适量的预紧^[79]。对于高速精密主轴中的角接触球轴承,径向预紧和轴向预紧同时存在,轴承内圈与主轴转子之间的过盈配合以及工况下轴承内外圈的温差会使轴承产生一定程度的径向预紧。对于轴向预紧,可以根据主轴的工况条件采用定位预紧、定压预紧和非均匀预紧方式^[80]。主轴的性能由主轴所执行的加工工艺决定,并且轴承的预紧力受工作温度的影响显著,机床主轴在进行高速切削时,在高速效应和切削载荷的作用下,轴承及主轴转子的动态特性、热态特性相对静止状态会发生改变,轴承的动态支撑刚度由离心力

软化效应和热诱导预紧力硬化效应联合作用决定^[81-82],故传统的定位预紧和定压预紧难以满足精密卧式加工中心的要求。为保证主轴在整个转速范围内的动态、热态特性全局兼优,主轴轴承预紧力的在线监测与智能控制显得尤为重要。

目前,国内对主轴预紧力在线监测与智能控制已有一些初步研究,主要体现在主轴预紧机构的设计和最佳预紧力的判定或计算^[83-85]。如何通过量化的方法确定主轴在整个转速范围内的动态、热态特性全局兼优的最佳预紧力,并综合考虑主轴的动态特性和热态特性对预紧力实施智能控制以及主轴预紧力智能控制算法,目前还缺乏系统研究。同时开发主轴预紧力评估系统,对于高速精密主轴的高质量装配具有重要的指导意义。

结束语

本文综述了精密卧式加工中心正向设计方法与数字化设计软件、几何精度设计、静刚度设计、整机阻尼设计、热平衡设计与温度场主动控

制、切削动力学建模与仿真、主轴单元设计技术等方面的国内外研究现状,探讨了相关领域的未来发展趋势。其中部分研究方法和成果具有通用性,亦适用于其他高档数控机床的正向设计。对于更加广泛的精密机床而言,从用户需求开始的正向设计理念和方法,提高精度和精度稳定性的方法和技术,智能机床与智能制造技术等有望成为未来的主要发展趋势。

参考文献

- [1] LEE I H, CHA J H, PARK M W, et al. An integrated inference architecture for machine tools design involving complex knowledge[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22: 321-328.
- [2] LIU L Y, CALDWELL B S, WANG H F, et al. A knowledge-centric CNC machine tool design and development process management framework[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(20): 6033-6051.
- [3] PARK M W, SOHN Y T. Development of integrated design system for structural design of machine tools[M]// ELMARAGHY H, ELMARAGHY W. Advances in design. Berlin: Springer, 2006: 547-558.
- [4] MYON W, CHA J H, PARK J H, et al. Development of an intelligent design system for embodiment design of machine tools[J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 329-332.
- [5] MAGLIE P. Parallelization of design and simulation: virtual machine tools in real product development[D]. Zurich: ETH Zurich, 2012.
- [6] SHI Y G, ZHAO X Y, ZHANG H J, et al. A new top-down design method for the stiffness of precision machine tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7705.
- [7] 薛令军. 精密卧式加工中心结构件质量匹配设计方法[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [8] XUE Lingjun. Mass matching design methodology for structural parts of the precision machining center[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [9] 牛文铁. 精密机床的质量匹配设计方法: CN104573201A[P]. 2015-04-29.

NIU Wentie. Mass matching design methodology for precision machine tools: CN104573201A[P]. 2015-04-29.

[9] 牛文铁, 王俊强. 一种面向机床有限元分析的导轨滑块数据库建立方法: CN103279536A[P]. 2013-09-04.

NIU Wentie, WANG Junqiang. Guideway database oriented to finite element analysis: CN103279536A[P]. 2013-09-04.

[10] 牛文铁, 王俊强. 一种面向机床有限元分析的丝杠螺母数据库建立方法: CN103294866A[P]. 2013-09-11.

NIU Wentie, WANG Junqiang. Ballscrew database oriented to finite element analysis: CN103294866A[P]. 2013-09-11.

[11] 牛文铁, 徐亚凯. 一种机床结构大件筋板布局及设计方法: CN103279614A[P]. 2013-09-04.

NIU Wentie, XU Yakai. Rib layout and design methodology for structural parts of machine tools: CN103279614A[P]. 2013-09-04.

[12] NIU W T, WANG P F, SHEN Y, et al. A feature-based CAD-CAE integrated approach of machine tool and its implementation[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 201: 54-58.

[13] 牛文铁, 田建伟, 王俊强. 基于iSIGHT的机床整机结构方案设计与集成优化[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2016, 49(2): 120-127.

NIU Wentie, TIAN Jianwei, WANG Junqiang. Schematic design and integrated optimization of machine tool based on iSIGHT[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2016, 49(2): 120-127.

[14] 赵小松, 方沂, 章青, 等. 四轴联动加工中心误差补偿技术的研究[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(6): 637-639.

ZHAO Xiaosong, FANG Yi, ZHANG Qing, et al. The study of error compensation technology for 4-axis NC machine tool[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(6): 637-639.

[15] 刘又午. 多体动力学的休斯敦方法及其发展[J]. *中国机械工程*, 2000, 11(6): 601-607.

LIU Youwu. Development of Huston's method on multibody dynamics[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(6): 601-607.

[16] 粟时平, 李圣怡. 五轴数控机床综合空间误差的多体系统运动学建模[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2003(5): 15-21.

SU Shiping, LI Shengyi. Modeling the volumetric synthesis error of 5-axis machine tools based on multi-body system kinematics[J]. *Modular Machine Tool & Automatic*

Manufacturing Technique, 2003(5): 15-21.

[17] 杨建国, 潘志宏, 薛秉源. 数控机床几何和热误差综合的运动学建模[J]. *机械设计与制造*, 1998(5): 31-32.

YANG Jianguo, PAN Zhihong, XUE Bingyuan. Kinematic modeling of geometric and thermal errors of NC machine tools[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 1998(5): 31-32.

[18] TIAN W J, GAO W G, ZHANG D W, et al. A general approach for error modeling of machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 79: 17-23.

[19] PARKINSON D B. Tolerancing of component dimensions in CAD[J]. *Computer-Aided Design*, 1984, 16(1): 25-32.

[20] LEE W J, WOO T C. Tolerances: their analysis and synthesis[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1990, 112(2): 113-121.

[21] LEE W J, WOO T C. Optimum selection of discrete tolerances[J]. *ASME Journal of Mechanical Transmission and Automation Design*, 1989, 111: 243-251.

[22] 刘玉生. 基于数学定义的平面尺寸和形位公差建模与表示技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

LIU Yusheng. Research on modeling and representation technology of dimension and tolerance based on mathematical definition[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.

[23] DOW T A, MILLER E L, GARRARD K. Tool force and deflection compensation for small milling tools[J]. *Precision Engineering*, 2004, 28(1): 31-45.

[24] MIYAGUCHI T, MASUDA M, TAKEOKA E, et al. Effect of tool stiffness upon tool wear in high spindle speed milling using small ball end mill[J]. *Precision Engineering*, 2001, 25(2): 145-154.

[25] SALGADO M A, LÓPEZ DE LACALLE L N, LAMIKIZ A, et al. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-mills under cutting force[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(6): 727-739.

[26] RATCHEV S, LIU S, HUANG W, et al. A flexible force model for end milling of low rigidity parts[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153: 134-138.

[27] PENG F Y, YAN R, CHEN W. Anisotropic force ellipsoid based multi-axis motion optimization of machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(5): 960-967.

[28] HUANG D T Y, LEE J J. On obtaining

machine tool stiffness by CAE techniques[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(8): 1149-1163.

[29] 汤文成, 易红. 地脚螺钉对床身动态特性影响的研究[J]. *机械设计*, 1997(12): 16-17.

TANG Wencheng, YI Hong. Research on the effects of ground screw to the dynamic characteristics of machine tool bed[J]. *Journal of Machine Design*, 1997(12): 16-17.

[30] 罗卫平. 支撑结构对五轴数控机床静动态性能的影响[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2011(4): 28-30.

LUO Weiping. Effect of support structure on static and dynamic performance of five-axis CNC machine[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2011(4): 28-30.

[31] 张辉, 于长亮, 王仁彻, 等. 机床支撑地脚结合部参数辨识方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014, 54(6): 815-821.

ZHANG Hui, YU Changliang, WANG Renche, et al. Parameters identification method for machine tool support joints[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2014, 54(6): 815-821.

[32] DAISUKE K, TAKAHIRO I. Stiffness model of machine tool supports using contact stiffness[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37: 650-657.

[33] 张明, 黄国庆. 磨床床身垫铁支撑布置探讨[J]. *机械制造与自动化*, 2010, 39(5): 35-36.

ZHANG Ming, HUANG Guoqing. Study of layout of pad iron in grinder bed[J]. *Machine Building & Automation*, 2010, 39(5): 35-36.

[34] 陈叶林, 丁晓红, 郭春星, 等. 机床床身结构优化设计方法[J]. *机械设计*, 2010, 27(8): 65-68.

CHEN Yelin, DING Xiaohong, GUO Chunxing, et al. Study on optimizing design method of machine tool bed structure[J]. *Journal of Machine Design*, 2010, 27(8): 65-68.

[35] 云青, 牛文铁, 王俊强. 精密机床床身结构三点支撑的多目标优化设计[J]. *机械设计*, 2015, 32(7): 1-7.

YUN Qing, NIU Wentie, WANG Junqiang. Multi-objective optimization of three-dotted supporting of precision machine tool bed structure[J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(7): 1-7.

[36] 郭明飞, 刘镇昌. 磨床床身支承方式的选择[J]. *机床与液压*, 2006(1): 56-58.

GUO Mingfei, LIU Zhenchang. The FEM analysis of a grinding machine's bed in strength

- and rigidity[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(1): 56–58.
- [37] 张浩. 精密卧式加工中心三点支承 T 型床身设计方法 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Hao. Design methods of T-shaped bed in the three-point support of precision horizontal machining center[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [38] 赵胜辉. 精密卧式加工中心 T 型床身三点支撑优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- ZHAO Shenghui. The optimal design of the three-point support of T-shaped bed of precision horizontal machining center[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [39] YIGIT A S, ULISOY A G. Dynamic stiffness evaluation for reconfigurable machine tools including weakly non-linear joint characteristics[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 2002, 216: 87–101.
- [40] YOSHIMURA M, HOSHI T. Computer approach to dynamically optimum design of machine tool structures[C]//*Proceedings of the Twelfth International Machine Tool Design and Research Conference*, 1972: 439–446.
- [41] MORI M, PINER Z I, DING K, et al. Virtual evaluation for machine tool design[C]//*Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2008.
- [42] HUNG J P, LA Y L, LIN C Y, et al. Modeling the machining stability of a vertical milling machine under the influence of the preloaded linear guide[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51: 731–739.
- [43] PATRICK V H. Optimal synthesis of compliant mechanisms using subdivision and commercial FEA[J]. *American Society of Mechanical Engineers*, 2006, 128(2): 14–18.
- [44] KROLLA L, BLAUB P, WABNERB M, et al. Lightweight components for energy-efficient machine tools[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011, 4(2): 148–160.
- [45] 付俊涛. 数控立式车床关键零件轻量化设计研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- FU Juntao. Research on mass-reduction design of key parts for CNC vertical lathe[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [46] 堤正臣. 机床螺栓结合面的阻尼机理 [J]. *机床译丛*, 1980, 47(2): 26–29.
- TSUTSUMI M. The damping mechanism for machine tool bolted joints[J]. *Machine Tools Translations*, 1980, 47(2): 26–29.
- [47] 刘晓平, 徐燕申, 彭泽民, 等. 模态分析和有限元法结合识别机械结构结合面动力学参数的研究 [J]. *应用力学学报*, 1993(4): 108–112.
- LIU Xiaoping, XU Yanshen, PENG Zemin, et al. Identification the dynamic parameters of structural joint via experimental and modal analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1993(4): 108–112.
- [48] 刘晓平, 徐燕申, 宋健伟. 机械结构结合面阻尼参数识别的研究 [J]. *振动与冲击*, 1995(3): 61–65.
- LIU Xiaoping, XU Yanshen, Song Jianwei. Damping identification of the mechanical structure joint surface[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 1995(3): 61–65.
- [49] 黄玉美, 付卫平, 佟浚贤. 获取结合面实用切向阻尼参数的方法 [J]. *西安理工大学学报*, 1996, 12(1): 1–5.
- HUANG Yumei, FU Weiping, TONG Junxian. A method of acquiring applied tangential damping parameters of joint surfaces[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1996, 12(1): 1–5.
- [50] 张广鹏, 史文浩, 黄玉美. 机床导轨结合部的动态特性解析方法及其应用 [J]. *机械工程学报*, 2002, 38(10): 114–117.
- ZHANG Guangpeng, SHI Wenhao, HUANG Yumei. Analysis method of dynamic behaviors of guide way joint and its application in machine tools design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(10): 114–117.
- [51] 张学良, 王南山, 温淑花, 等. 机械结合面切向接触阻尼能量耗散弹塑性分形模型 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(12): 43–49.
- ZHANG Xueliang, WANG Nanshan, WEN Shuhua, et al. Elastoplastic fractal model for tangential contact damping energy dissipation of machine joint interfaces[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(12): 43–49.
- [52] CHANG S H, KIM P J, DAI G L. Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines[J]. *Composite Structures*, 2001, 53(1): 1–8.
- [53] KIM J H, CHANG S H. Design of μ -CNC machining center with carbon/epoxy composite-aluminum hybrid structures containing friction layers for high damping capacity[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(9): 2128–2136.
- [54] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J. Thermal issues in machine tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2012, 61: 771–791.
- [55] 孙振宏. 基于流-固-热耦合的电机主轴热特性仿真分析与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- SUN Zhenhong. Research on experiment and simulation of thermal properties of motorized spindle based on fluid-solid-heat coupling[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [56] LIU T, GAO W G, ZHANG G W, et al. Supply power design of oil cooling strategies for precision ball screw unit[C]//*Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2015)*. North Carolina, 2015.
- [57] MIAN N S, FLETCHER S. Efficient thermal error prediction in a machine tool using finite element analysis[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22: 3266–3270.
- [58] 张大卫, 杨金玉, 高卫国, 等. 基于 CAE 热分析的机床结构工作空间热误差建模 [J]. *天津大学学报*, 2016, 49(2): 111–119.
- ZHANG Dawei, YANG Jinyu, GAO Weiguo, et al. Thermal error modeling of machine tool structure based on CAE thermal analysis[J]. *Journal of Tianjin University*, 2016, 49(2): 111–119.
- [59] MORI M, MIZUGUCHI H. Design optimization and development of CNC lathe headstock to minimize thermal deformation[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58: 331–334.
- [60] BRYAN J. International status of thermal errors research[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39(2): 645–656.
- [61] CHOU C, DEBRA D B. Liquid temperature control for precision tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990, 39(1): 535–543.
- [62] DONMEZ M A, HAHN M H, SOONS J A. A novel cooling system to reduce thermally induced errors of machine tools[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 521–524.
- [63] LIU T, GAO W G, TIAN Y L, et al. A differentiated multi-loops bath recirculation system for precision machine tools[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 76: 54–63.
- [64] 高卫国, 刘腾, 张大卫, 等. 一种精密机床温度场主动控制系统及方法: CN103235613A[P]. 2013–08–07.
- GAO Weiguo, LIU Teng, ZHANG Dawei, et al. An active control system and method for precision machine temperature: CN103235613A[P]. 2013–08–07.

- [65] 高卫国, 孙宏伟, 刘瑜, 等. 适用于机床温度场差异化控制的分层独立多点温控装置: CN103246300A[P]. 2013-08-14.
- GAO Weiguo, SUN Hongwei, LIU Yu, et al. A layered and independent multi-loops device for differentiated control of machine temperature: CN103246300A[P]. 2013-08-14.
- [66] TOBIAS S A. Machine-tool vibration[M]. New York: Wiley, 1965.
- [67] KOENIGSBERGER F, TLUSTY J. Machine tool structures-Vol. 1: stability against chatter[M]. New York: Pergamon Press, 1967.
- [68] MERRITT H E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research-1[J]. Journal of Engineering for Industry, 1965, 87(4): 447-454.
- [69] TLUSTY J, ZATON W, ISMAIL F. Stability lobes in milling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1983, 32(1): 309-313.
- [70] ALTINTAS Y, BUDAK E. Analytical prediction of stability lobes in milling[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(1): 357-362.
- [71] INSPERGER T, STÉPÁN G. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(1): 117-141.
- [72] DING Y, ZHU L, ZHANG X, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(5): 502-509.
- [73] SOLIS E, PERES C R, JIMENEZ J E. A new analytical-experimental method for the identification of stability lobes in high-speed milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(15): 1591-1597.
- [74] MOHIT L. Position-dependent dynamics and stability of machine tools[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2013.
- [75] ZULAIKA J J, CAMPA F J, LOPEZ L N. An integrated process machine approach for designing productive and lightweight milling machines[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(7-8): 591-604.
- [76] ZHANG L, GAO W G, ZHANG D W, et al. Rapid evaluation of machine tools with position-dependent milling stability based on response surface model[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(3): 1-12.
- [77] 蒋书运. 高速电主轴动态设计方法[J]. 世界制造技术与装备市场, 2004(5): 54-56.
- JIANG Shuyun. Dynamic design of high speed motorized spindle system[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2004(5): 54-56.
- [78] 张曙, 张炳生, 卫美红. 机床的动态优化设计[J]. 制造技术与机床, 2012(4): 9-13.
- ZHANG Shu, ZHANG Bingsheng, WEI Meihong. Dynamic optimum design of machine tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(4): 9-13.
- [79] HARRIS T A. Rolling Bearing Analysis[M]. New York: Wiley, 1966.
- [80] WU W W, LI X H, XU F, et al. Investigating effects of non-uniform preload on the thermal characteristics of angular contact ball bearings through simulations[J]. Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(6): 667-681.
- [81] LIN C W, TU J F, KAMRAN J. An integrated thermomechanical dynamic model to characterize motorized machinetool spindles during very high speed rotation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(10): 1035-1050.
- [82] 杨佐卫, 殷国富. 高速电主轴热态特性与动力学特性耦合分析模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(1): 100-105.
- YANG Zuwei, YIN Guofu. Coupling analysis model of thermal and dynamic characteristics for high-speed motorized spindle[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2011, 41(1): 100-105.
- [83] 纪宗辉, 熊万里. 兼顾低速重载和高速轻载电主轴的可控预紧方法研究[J]. 制造技术与机床, 2009(12): 132-136.
- JI Zonghui, XIONG Wanli. Research on a controllable preload method of high frequency spindles with characteristics of low-speed heavy and high-speed light loads[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(12): 132-136.
- [84] 邓四二. 精密高速磨床主轴支承轴承最佳预紧力计算[J]. 磨床与磨削, 1999(1): 54-56.
- DENG Sier. Calculation of optimum preload for high-speed precision grinder spindle[J]. Grinder and Grinding, 1999(1): 54-56.
- [85] 刘显军, 洪军, 刘志刚. 不同载荷工况下机床主轴预紧力选取的数值分析方法[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(2): 90-94.
- LIU Xianjun, HONG Jun, LIU Zhigang. Numerical analysis method on preload selection for machine tool spindle under different load conditions[J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(2): 90-94.

Progress on Key Technologies of Top-Down Design for Precision Horizontal Machine Tools

ZHANG Dawei, GAO Weiguo

(Tianjin Key Laboratory of Equipment Design and Manufacturing Technology, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300355, China)

[ABSTRACT] The state of arts on design technologies of precision horizontal machine tools has been introduced in this paper. The key technologies are discussed, which include design methodologies and digital design software, geometric precision design, static stiffness design, damp design, thermal balance design, temperature active control for structures and key parts, modelling and simulation of cutting dynamics, spindle unit design.

Keywords: Precision horizontal machine tool; Geometric precision; Static stiffness; Thermal balance design

(责编 谷雨)