

高速高精度机床热分析与热设计技术

高建民^{1,2}, 史晓军^{1,2}, 许艾明^{1,2}, 赵博选^{1,2}

(1.西安交通大学机械工程学院,西安 710049;2.西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

[摘要] 随着机床高速高精度的技术发展,热问题已成为影响机床特性的重要因素。从提高机床的固有热性能出发,系统介绍了机床热特性分析、热结构优化及其冷却技术的理论和方法,以及国内外研究现状,并探讨了机床“热设计”理论与技术的最新进展和未来研究重点及趋势。

[关键词] 高速高精度机床;热特性分析;热结构优化;冷却技术

[中图分类号] TG502 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)01-0028-06

1 前言

随着数控机床整机及零部件设计、制造、装配和材料等相关技术的不断进步,几何误差、刀具磨损、伺服等误差在数控机床整体误差中所占的比例逐渐减小^[1]。在高速高精度极端加工条件下,热变形日益成为影响机床加工精度的重要因素。大量研究与加工实践表明,对于高速高精度机床,由热变形引起的加工制造误差所占的比例为40%~70%^[2],热问题已成为影响机床精度的关键因素。为了减小机床热变形对加工精度和精度稳定性的影响,需要从设计、制造和使用等方面进行综合分析 & 优化。减少机床热误差的主要方法有两种:一是在设计阶段提高机床的热特性;二是在运行阶段对机床进行热误差补偿^[3]。目前最常用的是在数控系统中根据热变形进行热误差补偿。热误差补偿法在一定范围内可提高加工精度,有助于降低设计制造成本。但是,它是一种被动的和事后补偿的方法,其补偿范围和有效性具有一定的限制。当一个机床的热特性比较差的时候,仅靠事后的热补偿是无法满足加工精度要求的。要提高机床的精度和热性能,必须在设计阶段,从提高机床的热特性、热刚度入手,实现机床的主动热控,从根本上提高机

床的热性能。虽然人们自20世纪40年代就已开始对机床热特性进行研究,但是由于传统机床在精度和速度上没有现代制造要求的这么高,热问题不严重,且由于机床及其部件类型和负载的多样性、结构的复杂性以及机床温度场和热变形受多种因素的影响,故其研究一般都是针对具体机床,采用实验研究法或数值模拟法,分析机床的各种热源及其对机床温度场的影响,在机床热设计方面就形成了“头疼医头、脚疼医脚”的现象,没有形成系统的理论、方法和分析工具,这显然与当前机床高速高精度发展的要求不相适应。

机床热设计的核心目标是最大限度地控制温升,减小热变形,为部件级、组件级和系统级提供良好的热环境,保证它们在一定的热环境下,按预定的要求可靠地工作。机床热设计一般分为两大类,一类是机床结构的热平衡与优化设计技术,另一类是机床高效冷却技术。

2 机床结构的热平衡与优化设计技术

日本东京大学的佐田登志夫等把机床热变形看作是由于温度变化而引起的机床结构刚度不足,提出了“热刚度”的概念,并将机床的静刚度、动刚度和热刚度这3方面的问题统一起来研究^[4]。机

[收稿日期] 2012-10-20

[基金项目] “973”国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB314801)

[作者简介] 高建民(1958—),男,陕西韩城市人,教授,博士生导师,主要研究方向为机械制造及自动化、产品热分析与热设计以及制造信息化;E-mail:gjm@xjtu.edu.cn

床的热刚度是机床达到热平衡时的温升与热变形值之比,表示机床抵抗热变形的能力,是表征机床热特性的特征量。由于不同零件的热刚度对整机热刚度的影响不同,四川大学的阳红等在此基础上提出了机床重点热刚度的概念,并提出了一种基于热误差神经网络预测模型的机床重点热刚度辨识方法,为合理分配机床热刚度并为机床零部件的热刚度优化提供了依据^[5]。机床所有零部件的热刚度组成整机的热刚度。热刚度概念的提出统一了传统力学的刚度概念,对于形成统一设计理念与方法具有重要的指导意义。依据热刚度理念,机床结构热平衡设计的主要内容是以结构尺寸为设计变量,以弯曲、扭转等热变形的位移量为目标函数,以提高部件和机床整体的热刚度为目标进行优化设计。机床在热设计时需要根据机床的热特性从机床的主要热变形部分入手,即注重关键发热区域和热敏感部位,常见的如主轴的热膨胀、主轴箱的热变形、滚珠丝杠的热伸长以及立柱的热倾斜等,通过对这些关键部件进行结构热平衡设计,进而把握机床整体的热变形,再进行整体优化、均衡结构和对称结构设计。

日本大隈(OKUMA)公司基于其20年来对热变形处理的研发经验,提出了“热亲和”的概念。“热亲和”是指与热友好共处的构思^[6]。此前的机床采取的措施主要针对如何减少热的产生量或如何冷却。“热亲和”的构思是在尽量减少热量产生的同时接受热,合理利用热。虽然预测复杂的热变形很困难,但是通过“热变形单纯化”与“温度分布均匀化”的机床构造,进行可预测的规则热位移,并正确地进行热结构平衡补偿控制(见图1),即使没有恒温室等大型的设施,也可以形成稳定的热结构,并维持高精度。“热亲和”思想是合理利用热,实现规则的可控热变形,它可以使机床在温度变化时保持相同的热平衡结构,将热变形抑制在最小程度。一般常用的结构是以加工点为中心的“热对称结构”,使构成要素形状简化的“箱式组合结构”,以及通过护盖与附属单元合理布局使温度分布均匀化的“热均衡结构”。如主轴采用简单热变形结构,应用正确的热位移补偿方式,使主轴能在长时间运转中保持热变形在4 μm以内。采用合理的热力学结构,无论是切削加工、电机驱动及构件运动导致的机床温度变化,还是切削液、车间环境等引起的温度变化,机床都会规则地按照预测的方向与位移量进行伸缩,这样就为合理的热控奠定了基础。

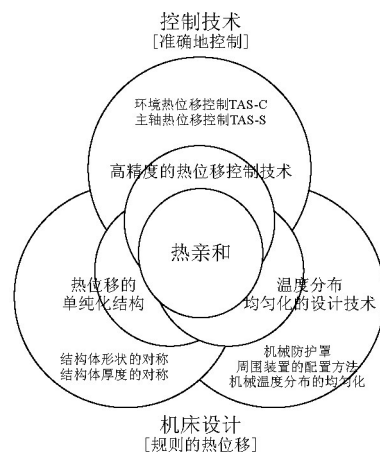


图1 热亲和概念图

Fig.1 Thermo-friendly concept diagram

注:TAS-C为环境热位移控制;TAS-S为主轴热位移控制

吉田嘉太郎在1973年提出了“热中性轴”的概念,他认为主轴热位移会因主轴箱内热源和支撑方式的改变而不同,因此应该设法寻求在机床热变形状态下,保持主轴位置不变,从而提高机床的热精度。后来他将这一概念进一步发展为“热对称面”的概念,把最影响加工精度的零件配置在热对称面上,大大改善热变形所引起的加工精度不良的状况^[7],利用该理论设计的双立柱夹箱式结构就是一个典型的热对称结构,可避免一般单立柱机床经常出现的主轴热倾斜现象。瑞士在机床设计中也十分重视热源对机床的影响,主张热源对称分布。如果一台机床仅在一侧设置油箱或电机,由于受热,易使机床倾斜;若在机床两边对称配置电机,使其两边受热条件均匀,就不会产生左右倾斜。作为机床主要基础件,立柱、床身、主轴箱的力学特性和热学特性对机床的加工精度和精度稳定性有较大的影响。在这方面的研究表明,主轴箱变形量的不对称性会导致主轴轴线的偏移或产生偏角;增加局部厚度,改变筋板布置形式可在减轻床身重量的同时改善床身的结构变形。合理选择立柱结构尺寸参数可提高其热刚度,对基础件的热对称设计(结构对称设计和热源分布对称设计)是减小有害热变形的有效措施。

另外,热容量平衡设计也是改善热变形有效的方法。它是根据机床各部件热容量的不同,对局部热容量大的部件采取一定的措施来控制 and 减少其温升,使它与热容量较小的部位不致产生较大的温差,尽量达到它们之间的热平衡,从而使机床整体的热变形减少。合理地设计机床散热板有利于平衡部件之间的温度场。

此外,机床热结构优化技术还包括反变形技术,另外,使用花岗岩、陶瓷、混凝土、玻璃钢等新材料也可以减少热变形^[8]。用反变形来抵消热变形的不良影响是一种简单易行的有效方法。呼和浩特第三机床厂以某平面磨床为例,在加工时主动对机床导轨采用中凸结构,很好地提高了磨床加工精度的稳定性。机床热设计的另外一种重要方法就是设计高效的冷却系统,通过控制机床的温度变化来提高机床的精度。

3 机床冷却设计技术

先进的冷却系统是提高机床热精度的一个重要手段。冷却系统的设计主要包括高效的冷却结构设计、高效冷却介质的选择和自适应的冷却控制系统。一般由于机床的发热源处在不同的部位,是一个不平衡体,因此,都是根据不同的工作状态,对主要发热的关键零部件进行冷却。

3.1 主轴冷却技术

高速、精密数控机床主轴系统多采用电主轴,但高速电主轴的本身结构存在散热缺陷。这是因为高速电主轴的电机内置、外壳封闭,使得电机和轴承产生的大量热量难以快速排走,且轴承的发热量随主轴转速的升高而增加,导致主轴和轴承均产生变形。因此,控制温升、减小电主轴热膨胀是电主轴的主要问题。国内外学者对电主轴热特性进行了大量研究,改善主轴热变形的冷却措施主要有如下几个方面^[9-14]。

1)改进冷却设计。高速主轴传统的冷却方式是在主轴壳体螺旋孔道内加冷却油进行强制对流冷却,并不断循环将热量带走。但这种方式冷却效率低,无法直接带走主轴轴芯和转子的热量。为了进一步降低电主轴轴芯的热膨胀,研究人员设计了采用轴芯冷却设计的电主轴。由于热管具有高效的导热性、温度的均匀性及结构的多样性等特性,近年来被广泛应用于对高速电主轴的壳体和轴芯进行冷却。

2)均衡温度。对主轴热源不易控制的场合,提高热源附近温度,使主轴温度较高位置的热量尽快传递到温度较低的位置,快速均衡主轴各部位温度来减少热误差。

轴承是主轴系统的主要热源,也是机床的主要失效部件。轴承发热主要是由于接触摩擦生热,包括滚动体与内外滚道的滚动和滑动摩擦、保持架与套圈引导面之间的滑动摩擦、滚动体与保持架之间

的滑动摩擦、滚子端面与挡边之间的滑动摩擦以及润滑剂粘性摩擦。如果轴承得不到有效润滑冷却,随着热量的积聚,就会因内部工作温度过高而造成轴承失效。低速轴承主要靠润滑油冷却,高速轴承主要有3种冷却方式,即喷射润滑、环下润滑和油雾润滑。其中环下润滑用油量少,且减小了轴承的搅油功率损耗,冷却效果较好。随着对润滑、冷却要求的不断提高,油气润滑成为更加理想的润滑方式,可对轴承内外圈和滚珠进行强迫对流冷却。现阶段轴承冷却方法^[15-19]有3种方式。

1)带有冷却室、冷却水道的轴承座。

2)设计低温轴承结构。轴承保持架的导向区被精确地定位在离心力对润滑剂作用最大的地方,保证重要摩擦接触区域有可靠的润滑剂供应。

3)改善冷却油注入方式。将油从均匀分布的管道和喷油口喷出,通过提高流速和油的利用率让冷却油充分到达转子,形成均匀的油膜,从而降低轴承温度,提高轴承寿命。

3.2 高速切削刀具冷却技术

高速切削时的切削速度是传统切削速度的5~10倍,主轴转速高达万转甚至十万转每分钟,切削效率高,且切削力降低,适合加工精密零件。但高速切削会产生大量切削热,会影响刀具寿命和加工精度。影响切削温度的主要因素有切削参数(切削速度、切削厚度和刀具前角)、刀具与工件的导热性能以及刀-屑、刀-工件的摩擦系数等^[20]。切削热包括切削层金属的剪切变形热、切削底层金属的摩擦挤压变形热和已加工表面上的摩擦挤压变形热,切屑发生塑性变形所消耗的功率主要转化为热量,进而形成切屑加工热。

高速切削过程是一个复杂的动态过程,包含弹塑性变形、大变形和高应变率以及很高的切削温度和复杂的摩擦条件。以弹塑性大变形分析为基础,采用热-应力耦合分析和热弹塑性分析等有限元数值模拟方法将会促进对高速切削过程热行为的研究。基于三维的热有限元建模,针对不同刀具材料、不同加工方式和冷却方式的刀具切削性能的分析将是未来研究的重点^[21,22]。

在刀具冷却技术方面,目前提出了先进的带冷却液通道的刀具。在冷却液方面,水基液的冷却效果良好。针对不同冷却液有很多研究人员通过实验改良冷却液成分,以期得到更佳的冷却效果。冷却液的渗透性和加注方位与流量是影响冷却液冷

却效果的两个关键因素。国内外研究了采用超声波处理等技术提高冷却液渗透性来提高冷却效果。为了使用最少的冷却液实现最佳的冷却效果,研究了加注方位和流量的影响。

目前,干式切削、液氮冷却切削、水蒸气冷却切削、气体射流冷却切削、低温风式冷却切削以及最小量润滑切削等几种绿色切削冷却方式日益受到人们的重视。上述冷却方式在成本、实现难易程度上各有不同,多种方式还处于理论机理研究和实验研究的阶段,应用不多。设计者应权衡利弊,针对特定机床与环境选择恰当的冷却方式。但总体来说,绿色切削技术可以提高刀具使用寿命及加工质量,且对环境无污染,对人体健康无害,在实际应用中取得了良好效果,是金属切削加工领域今后的发展方向。目前,高速(超高速)干式切削技术和开发无污染的生态切削液是绿色切削技术的发展重点^[23]。

3.3 进给系统冷却技术

滚珠丝杠副处于进给系统传动链的末级,起到精密传动和定位的作用,是数控机床和加工中心的关键部件,它的传动误差将直接影响到机床的定位精度。在滚珠丝杠高速化后,由于存在滚珠之间、滚珠与滚道以及两端支撑轴承和驱动电动机多处摩擦作用,滚珠丝杠温升不可避免。而且滚珠丝杠为细长件,温升会降低丝杠的轴向刚度并造成丝杠热伸长,影响定位精度。从设计方面改善滚珠丝杠的热特性主要采用3种方式^[24-26]。

1) 将丝杠预拉伸,预拉伸量可略大于热伸长量,以提高丝杠的轴向刚度和减小丝杠启动和停止瞬间弹性变形。

2) 加大散热的强制冷却的结构设计,如空心丝杠、螺母冷却结构和支撑轴承的冷却结构。

3) 选择合适黏度指数的润滑油及充分供油以减小摩擦力矩。

导轨发热使导轨产生膨胀变长和微翘等变形,这将直接导致机床加工刀具分支的扭转和倾斜,从而影响加工精度。导轨发热是因为两个滑块在导轨上的直线运动摩擦所致。这两个移动热源发热量由承载压力和滑块移动速度决定。传统导轨的散热方式主要有两种方式,即自然对流(导轨外表面与空气之间的热交换)和导轨表面使用润滑脂(油)进行润滑和冷却。近年来,在一些机床上出现了新的导轨结构设计,导轨内部设计有冷却循环孔道,并产生了导轨镶注冷却水管工艺等相关工艺技术^[27,28]。

除上述机床关键零部件冷却技术外,对于整个机床或关键部件可采用热源温度场平衡技术,利用人工热源,促使机床缩短温升平衡过程,减少加工过程中温升场变化,以达到稳定热态加工精度的目的。

上述冷却方式设计好以后,都是以固定参数运行,实际上如何根据环境与加工工况的温度变化调整冷却工质的参数,从而实现冷却系统控制的智能化仍是一个没有解决的问题。

4 机床热特性分析技术

机床热特性分析技术是实现机床热设计的基础。机床热特性分析通常采用实验研究方法和数值模拟法。实验研究方法一般用红外热像仪、热电偶、激光干涉仪和微位移传感器等精密测量仪器,进行机床空运转综合试验、分离热源试验和磨削试验确定主要热源,并测量各内热源作用下机床各部件的温升、温度场变化、热变形和达到热平衡的时间^[29]。因为机床热误差并不是仅仅和机床某一点的温度变化呈线性对应关系,而是受到各热源的综合作用,并和机床的整体温度变化有关,因此,必须在机床上布置多个测点,并通过数据处理分析找到和热变形相关性好的重要测点,即热关键点^[30]。如何选择最少的传感器和最佳测量位置,并能最大程度地和机床的热变形误差相对应呢?通常采用两种实验方法来确定机床的热关键点,一是根据实验数据计算热变形量与各测量位置温度变化之间的相关系数,去掉相关系数小的点;二是分析温度变化曲线,剔除提供重复信息和处于不敏感位置的测温点^[30,31]。机床各发热部件从开始工作到达到热平衡是一个温升过程,热学理论一般将该温升过程用指数函数描述。无锡内圆磨床研究所管仁伟等采用回归分析方法得到了机床温升与时间的方程,用此方程可近似求出机床部件最大温度、机床温升和热平衡时间等机床热态特性评价指标参数^[32]。

实验法通常需要花费大量的时间与经费,而且受实验条件限制,还往往难以获得全面的热误差信息。随着计算机技术的发展,数值模拟方法越来越多地被用于机床热误差的分析。有限元仿真和热网络法是目前主要的机床热特性数值模拟分析方法。图2为秦川机床厂某型号磨床的有限元热分析结果。有限元热特性分析的关键所在是建立精确的模型。建立有限元模型包括3个重要内容,即妥善的网格划分、恰当的单元选择和边界条件的正确

施加。然而有限元建模过程中的不确定因素对有限元计算结果的影响很大。如有限元建模过程中存在的离散误差(单元形式、网格划分)、形状误差(模型结构简化等)、参数误差(载荷误差、物理参数等)等,特别是有限元边界条件参数的设定往往与实际不相符,导致机床的热特性分析结果与实际结果存在一定的误差。为了降低机床有限元分析的误差,将实验方法与有限元分析方法相结合,可有效提高数控机床热特性分析精度。如有学者应用响应面法构造电主轴系统的对流换热系数与测点温度之间的隐性关系,以实验测得的温度与测点温度计算值的误差作为寻优函数,最终优化各对流换热系数^[33]。经修正后的边界条件能使得到的温度场结果误差大大减小,与实验相结合的机床有限元仿真能使所建立的模型更加精确。

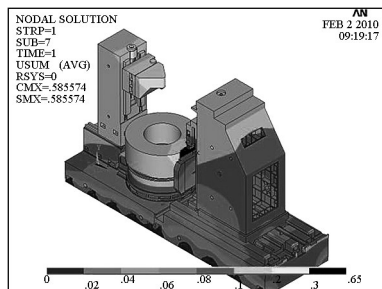


图2 机床整机有限元热分析云图
Fig.2 Finite element analysis thermal nephogram of a machine tool

此外,结合面问题是有限元分析的难点。国内外学者已经在接触热问题上做了很多研究,主要从接触表面形貌和弹塑性接触机理入手,结合分形理论和统计推理技术等建立合适的热接触分析模型^[34-36],利用建立的模型计算结合面的接触热阻,或者采用实验手段测定实际的接触热阻。结合面接触热阻影响因素包括接触体材料类型、结合面压力、表面加工质量和介质类型等。目前,对机床的主轴或电主轴系统、滚珠丝杠系统以及工件装配部分的有限元数值模拟均考虑了接触热阻的影响,进而为机床整机精确分析提供了条件。

虽然有限元法具有边界适应性好、计算准确度高等优点,但计算过程复杂,适合于理论研究及需要对温度场详细了解的场合。热网络法^[37, 38]是一种基于热电比拟原理的集中参数数值分析方法,又称热阻热容法。相对于有限元法,热网络分析法的优点是物理意义清晰,划分的节点能够反映物理模型

的本质,并能根据物理模型节点温度的变化率确定其温度变化趋势,其网格划分简单,易被工程技术人员掌握。采用热网络计算复杂大系统的传热问题,具有简单可行、边界条件易于处理等优点。尤其是对于包含润滑冷却液、油气混合物、固体结构件等多相传热介质的复杂系统热分析以及薄壁介质问题的处理而言,热网络法要优于有限元法。运用热网络法可以方便、快捷地实现机床系统的热设计,量化分析改变材料类型、结构尺寸和接触状况对机床温度场的影响。采用热网络法对机床热关键部件,如主轴系统、立柱、轴承等展开热特性研究是机床热特性分析的又一个重要手段。

5 结语

“热刚度”、“热亲和”和“热对称”的概念都是试图通过设计合理的机床结构,根据机床的热特性,实现机床的热平衡,从而提高机床的热精度。但是,目前在机床热结构设计理论方面,尚未形成完整的理论体系。随着现代制造技术对机床高速高精度加工的工艺要求,需要总结前人经验,综合应用现代技术,将传热学、计算机辅助设计/计算机辅助工程(CAD/CAE)、有限元方法、热网络计算、测量等多学科交叉融合,从系统的角度结合机床工作热特性,将事后热补偿与主动热平衡思想有机融合,研究机床整体系统的热设计和冷却问题,形成系统化的热设计理论方法和工具。通过建立机床热特性、热结构与冷却设计技术的知识方法库,以满足现代高速高精度机床的热设计要求。

参考文献

- [1] 阳红,殷国富,刘立新,等.基于热态信息链的龙门加工中心结构优化技术[J].计算机集成制造系统,2011,17(11):2405-2414.
- [2] Weck M, Mc Keown P. Reduction and compensation of thermal error in machine tools [J]. Annals of the CIRP, 1995, 44(2): 589-598.
- [3] Yang S, Yuan J, Ni J. Accuracy enhancement of a horizontal machining center by realtime compensation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1996, 15(2):113-124.
- [4] 佐田登志夫,佐藤和信,竹内芳美,等.机床结构的刚度分析系统——热刚度分析[J].装备机械,1979(2):18-25.
- [5] 阳红,方辉,刘立新,等.基于热误差神经网络预测模型的机床重点热刚度辨识方法研究[J].机械工程学报,2011,47(11):117-124.
- [6] 傅建中,姚鑫骅,贺永,等.数控机床热误差补偿技术的发展状况[J].航空制造技术,2010(4):64-66.
- [7] 陈兆年,陈子辰.机床热态特性学基础[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [8] Kim H S, Jeong K S, Lee D G. Design and manufacture of a

- three-axis ultra-precision CNC grinding machine[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 258-266.
- [9] 邓君,许光辉. 高速电主轴采用轴芯冷却的设计[J]. 装备制造技术, 2010(7):52-53.
- [10] 于子良. 数控机床电主轴设计的若干问题及探讨[J]. 装备制造技术, 2008(5):148-150.
- [11] 何晓亮,熊万里,黄红武. 高速精密主轴轴承热特性的计算和分析[J]. 机械, 2003, 30(6):14-16.
- [12] 应一帆. 大功率高速电主轴电动机冷却系统的设计[J]. 制造技术与机床, 2010(1):132-134.
- [13] 马平,白钊,李锻能,等. 高速大功率电主轴的油水热交换系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(6):15-19.
- [14] 李伟光,朱火美,刘栓权,等. 高速电主轴冷却系统的创新设计[J]. 制造技术与机床, 2009(4):36-39.
- [15] 何晓亮,熊万里,黄红武. 高速精密主轴轴承热特性的计算和分析[J]. 机械, 2003, 30(6):14-16.
- [16] 马美玲,邓四二,梁波,等. 火箭发动机低温轴承的设计[J]. 轴承, 2006(6):10-12.
- [17] 符祚钢. 新一代低温轴承[J]. 制造技术与机床, 2004(5):108-111.
- [18] 江苏龙达传动有限公司. 一种冷却水道的轴承座:中国. 201010260982 [P]. 2011-01-26.
- [19] 刘喆,王燕霜. 滚动轴承温度场研究的现状和展望[J]. 机械传动, 2010, 34(3):88-91.
- [20] 孟辉,赵军,王素玉,等. 刀具温度场的有限元分析[J]. 现代制造工程, 2005(1):58-60.
- [21] Lin Z, Lin Y. Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elastic-plastic FEM[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1999, 41(8):941-965.
- [22] 唐志涛,刘站强,艾兴. 金属切削加工热弹塑性大变形有限元理论及关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(6):746-751.
- [23] 韩荣第,吴健. 绿色切削技术探讨[J]. 工具技术, 2006, 40(12):8-10.
- [24] 夏军勇,胡友民,吴波,等. 考虑热弹性的滚珠丝杠热动态特性[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(3):1-4.
- [25] Sun Kyu Lee, Jae Heung Yoo, Moon Su Yang. Effect of thermal deformation on machine tool slide guide motion[J]. Tribology International, 2003, 36:41-47.
- [26] 苟卫东,杨锦斌,谢黎明,等. 数控机床进给系统热变形分析及补偿抑制对策[J]. 制造技术与机床, 2011(8):50-53.
- [27] 郝立昌,李涛,周文军. 机床铸件导轨镶铸冷却水管的工艺技术[J]. 铸造技术, 2004(7):554-555.
- [28] 孙志伟,杨强,高沛,等. 基于有限元法的机床导轨热特性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(7):1000-1003.
- [29] 林伟青,傅建中. 数控机床热误差建模中的温度传感器优化研究[J]. 成组技术与生产现代化, 2007, 24(3):5-8.
- [30] 杨庆东,陈焱. 欧共体对机床热变形的研究[J]. 制造技术与机床, 2000(7):19-20.
- [31] 陈征,狄瑞坤. 关于机床热关键点的辨识问题的研究现状分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(2):33-34.
- [32] 管仁伟,章秋平. 机床热态特性的回归分析方法[J]. 江苏机械, 1988(06):22-25.
- [33] 吴佳燕,李郝林,应杏娟. 基于响应面法的数控机床主轴系统热特性有限元模型修正[J]. 工具技术, 2010, 44(2):59-62.
- [34] 赵永武,吕彦明,蒋建忠. 新的粗糙表面弹塑性接触模型[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3):95-101.
- [35] 许敏. 固定结合面动态与热态特性分析[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [36] Mahumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of Tribology, ASME, 1991, 113(1):1-11.
- [37] 褚启勤,赵汝嘉,孙为民. 机床热特性分析中的热网络法[J]. 磨床与磨削, 1990(3):50-54.
- [38] 胡旭晓. 数控成形磨床关键部件热态分析[D]. 杭州:浙江大学, 2010.

Thermal characteristic analysis and thermal design technology for high speed high precision machine tools

Gao Jianmin^{1,2}, Shi Xiaojun^{1,2}, Xu Aiming^{1,2}, Zhao Boxuan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[Abstract] Based on how to improve the inherent thermal performance of high speed high precision machine tools, theories and methods about thermal characteristic analysis, thermal structure optimization and cooling technology were introduced systematically in this paper. In order to provide reference for machine tools researchers and designers, the latest progress and technology on thermal design of machine tools were reviewed and research emphasis and directions were also discussed.

[Key words] high speed high precision machine tool; thermal characteristic analysis; thermal structure optimization; cooling technology