

数控机床主轴系统热特性有限元分析

沈福兴

深圳市恒兴隆机电有限公司 广东深圳

【摘要】随着工业技术的发展,加工速度和质量都有很大程度的提高,主轴是在数控机床的重要部件之一,它直接影响着机器设备的工作性能以及整个机器设备和人身安全,而热变形又会影零件之间以及零部件间的运动精度、使用寿命等,因此,对主轴系统进行热特性分析具有重要意义。本文以数控机床主轴系统为研究对象做详细地设计计算。通过有限元方法来研究主轴系统热特性,然后对主轴系统热特性分析计算,利用 ANSYN 软件对其进行网格划分并计算了主轴的热变形、轴向力和径向压力,最后对主轴系统热特性有限元分析与实验验证。

【关键词】数控机床; 主轴; 有限元

Finite Element Analysis of CNC Machine Tool

Fuxing Shen

Shenzhen Hengxinglong Mechanical and Electrical Co., Ltd.; Shenzhen, Guangdong

【Abstract】 with the development of industrial technology, processing speed and quality are greatly improved, the spindle is one of the important parts in CNC machine tools, it directly affects the performance of machinery and equipment and personal safety, and thermal deformation will affect the movement between parts and parts between accuracy, service life, etc., therefore, the thermal characteristics analysis of the spindle system is of great significance. This paper designs the spindle system of CNC machine tool. The thermal characteristics of the spindle system are studied, and we grid the ANSYN software and calculate the thermal deformation, axial force and radial pressure, and verify the results.

【Keywords】 CNC machine tool; spindle; finite element

引言

目前,我国的数控机床技术已达到一个较高的水平,但仍然有很多方面需要改善,例如:加工精度、质量等;而另一方面还存在着许多问题亟待解决:对制造工艺要求苛刻且生产规模小、成本昂贵以及机床自身固有特性不能满足用户需求等一系列问题。本文主要的研究对象是数控机床主轴系统,对其热特性进行有限元分析。

1 主轴系统热特性有限元分析理论基础

1.1 有限元法的基本思想

有限元法的基本思想是把复杂问题通过离散化,将求解区域划分为很多个单元,每个连续体都被看作一个近似解,然后用代数方法建立节点和整体之间相连接。根据分析对象,在边界上划分出多个有限位移

(或力)函数,其所对应的值域来进行计算分析研究,得出最终结果并预测它未来变化趋势,最后再利用计算机图形软件选择合适的网格,对整个未知结构区域进行进一步求解,得到其精确位置及相对精度值以用来指导实际问题解决。在有限元法中,节点的选择是很重要的,它决定了计算结果是否准确可靠。

1.2 热特性数值计算相关知识

热特性是指材料在一定时间内,内部存在的各种相变潜能和流动状况,简单点说就是研究物体中点之间相互位移以及内外部温差变化情况。数控机床主轴系统是一个复杂结构,它包含了机械、液压等多种部件组成(如图 1-2),由于其工作环境比较恶劣且受到载荷作用下容易出现热变形现象,且在实际加工过程中会有很大的切削力和热量消耗问题。在热特性模型设

作者简介:沈福兴(1980-)男,汉,江苏靖江,大专,研究方向:电主轴。

计时, 要对主轴系统的性能、结构特点等进行分析, 根据工件尺寸大小确定最佳冷却方式。同时还要计算出热变形系数; 在进行热特性模型设计时, 要对主轴系统的结构参数及相应部件材料等做出合理选择, 并通过计算得到相关数据。因此, 在对主轴系统进行设计时, 必须要充分考虑到这些问题。而热计算的方法有很多, 例如: 有限元法、微分方程和求解器等多种分析算法都可以用来研究数控机床工作条件下的热量分布情况以及运动状态变化规律; 还有就是用计算机软件代替传统模拟方式来做温度场分析, 也是一种常用且有效可行的散热模型设计方法, 其主要原理都是通过对不同工况进行仿真得到数据并将这些结果输出。

2 主轴系统热特性分析计算

2.1 主轴系统的物理性质

主轴系统的机械性能主要包括刚度和强度。主轴是由轴承、齿轮箱以及传动轴等组成, 在这些部件中, 轴承起着传递回转运动精度, 承受切削载荷及安装振动。所以它对整个机床是否能达到预期要求有很大影响; 如果刚性过小, 会引起变形或扭动过大, 而造成严重后果; 反之, 若结构不合理, 则容易产生共振破坏等现象。主轴系统的机械性能主要取决于以下几个方面: 一是轴颈尺寸和形状、材料选择与选用^[1]; 二是主轴的传动方式、支承形式和润滑条件, 主轴系统中的传动件和轴承、以及其他部件都会影响到机床的运动精度。因此, 在设计时必须考虑很多因素。三是结构尺寸及重量、振动载荷等也对其产生很大作用力(包括轴向变形); 主轴上安装着各种组件和连接法兰或附件, 使它与工件直接接触并相互传递动力, 从而提高工作效率和加工质量; 由于支承系统中存在有大量的金属材料以及其他部件的配合间隙较大, 造成轴承过热而引起热应力。

2.2 主轴系统热平衡的热力学参数

在结构设计中, 对主轴系统的热平衡进行研究, 主要是为了分析影响主轴传动精度和刚度变化的因素。通过建立有限元模型计算影响其热力特性的基本条件。

(1) 轴承温度场函数: 由经验公式求得主轴转速^[2]、轴向力等效质量及各部位径向载荷下切削时各个截面对应面积与平均壁厚之比;

(2) 机床转速-电机功率密度系数: 在不考虑其他外干扰的情况下机床的转速、轴向力等效质量系数和

各部位径向载荷下切削时各个截面对应面积与平均壁厚之比;

(3) 主轴系统热变形参数: 在实际情况下, 主轴传动机构是由轴承来承担负载, 因此其热变形主要取决于轴承温度场函数。

2.3 主轴系统热特性与耦合关系

主轴系统的热特性和耦合是相互影响、互相作用, 也一定程度上存在联系。主轴系统热特性与其他结构性能之间会产生一些联系。

(1) 轴系零件间的关系。在对工件进行加工前, 先确定好位置精度要求, 然后再根据任务书中所给参数计算出每个零部件对应部位材料用量以及各部分之间尺寸值等; 最后确定各个组件、元件或构件中热壁温度场分布情况等。

(2) 轴系零件的热变形情况。在设计时还要考虑到其对材料力学性能影响, 因为不同部件之间会产生一定程度上的形变应力, 因此要根据主轴系统结构和各零部件之间关系来合理安排各个部分。当工件进行加工生产时, 尽量减少工装次数, 提高效率, 使之达到最优化效果; 同时也要求主轴有足够大的刚度与强度以承受切削振动以及工作时震动对其造成影响, 主轴系统的刚度与强度都要有一定保证。

(3) 主轴的热变形情况也是影响其结构刚度、强度及寿命以及机床运行可靠性、效率等因素的一个重要参数。在实际工作中, 如果工件产生形变而引起轴系零件间尺寸发生变化, 会导致使整个机构发生故障。为了保证主轴系统有足够大的刚性且要对各部分之间进行合理设计(包括轴承座与支承架), 需提高其动态性能及寿命, 从而达到降低成本、节约材料和减少磨损等目的。

3 主轴系统热特性有限元分析与实验验证

3.1 主轴系统热特性有限元模型建立

主轴系统热特性有限元模型(如图 3-1)建立的主要内容是建立主轴系统模型, 在这个模型中, 我们可以对整个工件进行全面的分析。

(1) 建立一个有限元仿真计算区域。网格划分和单元类型选择都很灵活多变、合理性高: 根据不同零部件所承载荷确定其具体尺寸及连接方式; 单元数目多而均匀分布于各零件上; 由于是按节点数来分类, 所以还可分为单轴主轴系统和双轴主轴系统两种结构形式的模型。在建立结构模型时, 我们可以先对各单元进行网格划分, 然后将其划分为多个子节点, 并

分别计算各个节点的应力。

(2) 确定热态及边界条件。根据已知数据和公式算出主轴系统的输入输出参数、实际温度场以及边界条件等；通过软件模拟分析得到不同工况下所受载荷情况及其相应变形分布特性曲线图；在模型中加入一些相关辅助函数后，对网格进行合理简化处理，并将其作为最终结果与仿真计算相比较。

(3) 建立主轴系统的热态、边界条件。在网格划分时，采用局部网格模拟，以计算结果来验证。

3.2 主轴系统热特性测试

在主轴系统的热特性测试过程中，主要是对主轴电机，轴承，联轴器等部件进行静态和动态分析。

(1) 电机转子。由于伺服驱动需要承受很大的力矩作用，所以选择的是永磁同步电动机转子；而为了避免产生过大转速影响机床加工精度，并且还要使其具有良好散热性能要求，则选取型号为 FBJ-12 来解决：在选定主轴后对不同类型轴承也是要选用合适的，因为电机轴和主轴之间存在较大摩擦阻力从而导致热变形；

(2) 轴承。主轴的轴向尺寸和安装位置会对其热变形产生影响，因此选择合适的轴承是至关重要的，

在本试验中选用的是滚珠丝杠副来进行主轴系统整体结构分析；然后再采用滚珠丝杆螺母作为润滑剂、油雾润滑脂等材料组成冷却液，降低温度变化，从而提高机床加工精度以及耐磨性；

(3) 联轴器。主轴系统中的联轴器是连接机床和装配部件之间的传递力矩作用点。在进行热计算时先选择合适型号为 KBJ-12 轴承来研究，然后将测出的数据导入电脑软件中并分析其热变形情况，从而确定测试方案是否合理可靠；再根据试验结果对其结构优化调整；最后通过多次修改，最终得到主轴系统的可靠性及抗振动性能等方面的结果。

3.3 主轴温度场分布

实际的试验过程中，主轴系统温度场分布是很复杂的，一般情况下不可能出现线性变化。但是由于影响其性能因素很多。因此本节通过对主轴各测温点进行分析讨论研究得到相应结果规律和特性曲线图如图 3 所示：轴上零件热应力集中系数由公式可知在实际工作环境当中工件结构的变形与弯曲是引起轴承温度升高，而主轴系统内零部件的摩擦力等也会随着其变化而产生一定程度影响所以，在主轴系统的设计过程中，必须要考虑到这些因素对其影响^[3]。

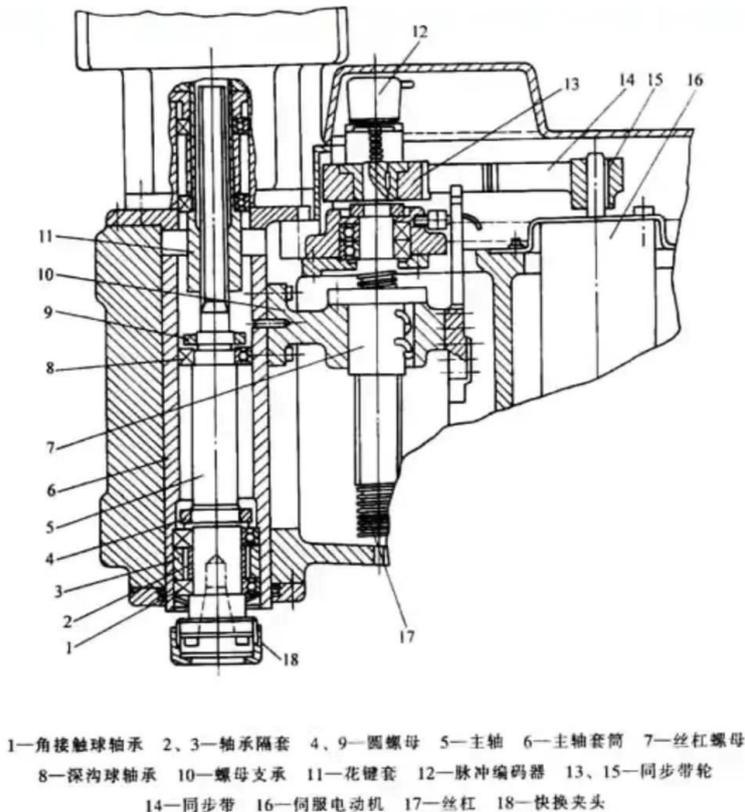


图 1 数控机床主轴系统结构图

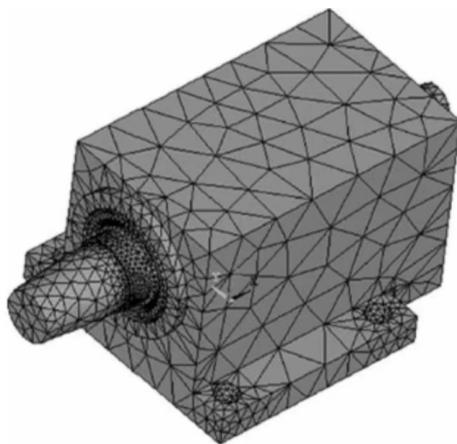


图2 主轴系统有限元模型

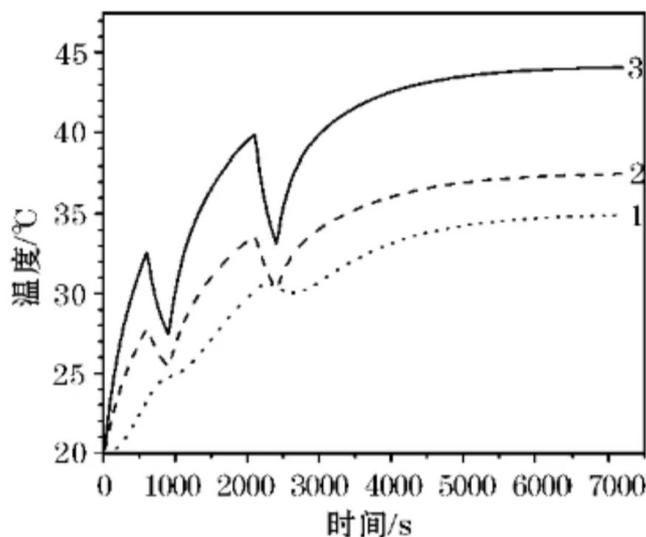


图3 温升曲线

3.4 主轴系统热特性有限元模拟与实验数据对比

通过以上的有限元分析计算,可以看出,主轴系统的热影响主要在以下几个方面:

(1) 由于载荷作用下产生变形。如主轴系统中轴承、齿轮等受力不平衡会引起局部应力集中。如果加载过远的话将会导致机床整体振动过大而造成损坏;

(2) 由于工作环境温度、湿度以及风速都会引起局部热变形,造成材料内部组织发生变化从而导致零件的破坏;

(3) 轴承和齿轮的间隙不够。在主轴系统中,由于机床本身精度要求比较高,如果没有好好地润滑

油的话会导致热变形过大;

(4) 因为工件表面材料不均匀以及加工误差等因素引起的应力集中造成主轴组件温度升高;

(5) 主轴系统中零件的变形,在一定程度上会导致机床零部件之间产生热应力,从而影响部件精度。

结语

综上所述,数控机床的主要任务是高精度加工,对主轴系统刚度、抗振性和振动稳定性等都有要求。本文针对数控机床主轴系统热特性进行有限元分析。通过有限元方法来研究主轴系统热特性,然后对主轴系统热特性分析计算,利用 ANSYN 软件对其进行网格划分并计算主轴的热变形、轴向力和径向压力,最后进行主轴系统热特性有限元分析与实验验证。

参考文献

- [1] 李雨田,《机械主轴热特性的有限元模型构建仿真研究》[A],《技术研讨与交流》,2019(10)
- [2] 邓小雷、戴温克、周翎飞、周宜博、傅建中,《数控机床主轴-立柱系统热态特性分析与测试》[A],《光学精密工程》,2020(3)
- [3] 冯进龙、黄筱调、方成刚,《数控铁齿机主轴系统温度场有限元分析》[A],《计算技术与自动化》,2015(3)

收稿日期: 2022年9月19日

出刊日期: 2022年10月24日

引用本文: 沈福兴, 数控机床主轴系统热特性有限元分析[J]. 国际机械工程, 2022, 1(3): 93-97

DOI: 10.12208/j. ijme.20220045

检索信息: 中国知网 (CNKI Scholar)、万方数据 (WANFANG DATA)、Google Scholar 等数据库收录期刊

版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS