

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.016

卧式加工中心热源贡献度求解与分析

席晨飞

(纽威数控装备(苏州)股份有限公司,江苏 苏州 215153)

摘 要:提出一种卧式加工中心热源贡献度求解方法。分析机床主要热源及热量传递规律,通过简化加工中心热量传递实体模型、计算热源生热率,建立整机温度场仿真模型,获得特定工况下温度分布云图;设计加工中心温度场测量方案,通过温度场实验数据验证有限元仿真模型,检验模型中需要修正的部分,为其可靠性提供试验数据支持;利用修正后的温度场模型进一步计算加工中心热变形,将各热源强度分别降低 20%,依次计算出单因素变化下的温度场及其热变形,并比较各热源强度变化对主轴热偏移的相对影响程度,进一步获得各热源对主轴热偏移的贡献度。

关键词:卧式加工中心;热源强度;温度场;热偏移;热源贡献度

中图分类号:TG659 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)01-0082-05

Solution and Analysis of Heat Source Contribution Degree in Horizontal Machining Center

XI Chenfei

(Neway CNC Equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215153, China)

Abstract: A method for solving heat source contribution degree of horizontal machining center is proposed. The main heat source and the heat transfer law of machine tool are analyzed. By simplifying the solid heat transfer model of machining center and calculating the heat generation rate of heat source, the temperature field simulation model of the whole machine is established, and the temperature distribution cloud map under specific working conditions is obtained. The temperature field measurement scheme of machining center is designed, through the experimental data of temperature field, the finite element simulation model is verified, the parts in the model that need to be corrected is checked, providing the test data support the model's reliability. The modified temperature field model is used to further calculate the thermal deformation of the machining center, the intensity of each heat source is reduced by 20% respectively. The temperature field and its thermal deformation under single factor changes are calculated in turn, and the relative influence of intensity changes of each heat source on the thermal migration of the main shaft is compared, and the contribution degree of each heat source to the thermal migration of the main shaft is further obtained.

Keywords: horizontal machining center; heat source intensity; temperature field; thermal offset; contribution degree of heat source

0 引言

随着数控机床的发展,机床对加工精度的要求越来越高。机床误差包括热误差、几何误差及接触力引起的误差,其中热变形引起的误差占机床误差的 40%~70%^[1-4]。机床各热源在运行期间产生大量的热,将机床整体温度升高并产生较大的热误差,是引起机床加工误差的主要因素之一,且机床越精密其热误差所占比例就越大,因此通过控制热误差以提升机床的加工精度很有必要^[5-6]。因此,研究机床温度分布、热源与热变形

之间的关系,可以更好地分析热误差对机床加工精度的影响。

减小内部热源对机床主体影响是避免热误差的主要手段,如冷却、隔热等。ZHAO 等^[7]设计了丝杠内置流道的冷却板并安装于热源处,每一冷却回路单独配置油箱进行独立调温。通过建立进给轴的轴承、电机及丝杠螺母等热源生热模型,精确匹配各热源生热率来控制冷却系统中进出口冷却液的温度。刘德行等^[8]采用了一种热-流-固耦合主轴有限元建模方法,在所建立的主轴热特性模型基础上提出了一种差异冷却策略。尹静

基金项目:工信部重大科技专项(2023ZY01049);江苏省科技成果转化项目(BA2018093);苏州市科技计划项目(LHT202307)

作者简介:席晨飞(1982—),男,山西洪洞人,高级工程师,硕士,研究方向为机床结构的仿真分析与优化设计、机床静动态性能测试、可靠性与精度保持性试验研究, xichfi@qq.com。

等^[9]采用模糊聚类结合 Pearson 相关系数法选出 4 个稳健性温度敏感点建立热误差模型,进行机床热特性及温度场分析,发现热源间的耦合作用对热误差建模产生影响。LU 等^[10]对增材制造过程中的热源进行控制,设计了带传感器的冷却回路,通过传感器的实时监测实现冷却的动态调节。何全文等^[11]以某立式加工中心主轴系统为研究对象,建立流场有限元模型,通过流场分析获得流体的温度分布、速度变化、压力变化及冷却器的温度分布,为主轴冷却器系统结构的优化设计和控制主轴热变形提供技术支持。李太松^[12]设计了一端进油一端出油、同一端进出油、螺母冷却等加工中心丝杠冷却结构,有效降低了丝杠温升对热误差的影响。李毅等^[13]设计了一种用于电主轴冷却的水冷机系统。根据电主轴热特性分析结果,提出了水冷机冷却方案,计算了相关的传热参数,并建立了电主轴温度与流速控制模型,有效降低了电主轴的热变形量。

通过以往的研究可以看出,冷却热源可以有效降低机床的温度场,进一步降低加工热误差。本文从传热学基本理论入手,设置温度场仿真的基本参数,构建温度场仿真基本模型;进行目标产品温度场试验,分步骤完成机床温度数据测量,验证仿真模型,并将温度场仿真数据以热载荷形式输入变形场,构建热变形仿真模型,进行热变形仿真;采用单因素法^[14]分析各热源温度变化量对主轴变形量的贡献度。

1 热特性分析有限元模型搭建

1.1 有限元仿真模型构建

假定物体是连续和均质的,在一个微元平行六面体中,将热力学基本定律和导热基本定律结合,可建立导热微分方程^[15-16]。

若物体材质不是均匀的,即各相异性时,得到导热微分方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho q \quad (1)$$

如果导热物体内部不存在热源且材料为各向同性,则式(1)简化为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式(1)和式(2)称为导热微分方程。导热微分方程适用于所有导热过程,是描述导热物质内

部温度场内在规律的方程,但是需施加限制条件(时间条件和边界条件)才能求解特定情况下导热问题的解。

在对机床进行建模时,首先要对其结构进行简化。简化的原则是尽量保持机床的原始结构,去掉螺钉孔之类的零件特征以及在结构中对有限元结果影响较小的零部件。简化的目的是避免小特征在网格划分时产生大量有限元单元,造成计算量过大等问题或由于结合面出现裂缝无法生成实体模型^[17]。简化效果如图 1 所示。

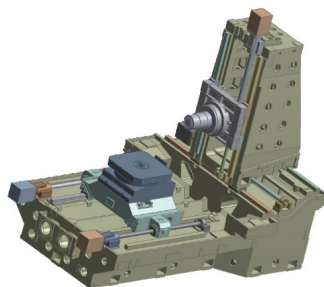


图 1 目标产品三维 CAD 简化实体模型

为了保证仿真和实验数据具有可比性,将仿真和实验设置相同的运动规律: x 方向、 y 方向、 z 方向电机稳定状态下为 3 250 r/min;主轴电机 2 500 r/min,从开机到停机均匀速转动;导轨快移速度均为 60 m/min。 x 方向导轨的行程 1 000 mm, y 方向导轨的行程 850 mm, z 方向导轨的行程 1 000 mm。 x 方向导轨运动 2 s,之后 y 方向导轨运动 2 s,接着 z 方向导轨运动 2 s,最后停顿 8 s。以此往复。

电机的功率和效率如表 1 所示。

表 1 机床电机参数

电机	额定功率/kW	满载机械效率
x 轴、 y 轴电机	8.2	0.95
z 轴电机	4.4	0.88
主轴电机	22.0	0.90

电机的生热率根据内部传感器监测的电流和电压值并结合电机效率和机床运动规律来计算。对于 x 轴和 z 轴电机,产热阶段在加速、减速的两个瞬间和匀速运动三个阶段。其中匀速运动时电机效率最低。加速和减速约占行程时间的 1/10。而且对于 x 轴和 z 轴电机来说,导轨未运动时,电机基本上不工作。故产生热量的阶段就在各自行程时间内。每个行程时间约占总时间的 1/7(2/(2+2+2+8))。

取 x 轴和 z 轴电机的空载效率 0.93,计算发

热功率(单位:W)。

x 方向进给电机发热功率

$$P_x = 23 \times 600 \times 0.07 \times (1/10) \times (1/7) + 0.8 \times 600 \times 0.85 \times (9/10) \times (1/7) = 66 \quad (3)$$

z 方向进给电机发热功率

$$P_z = 14 \times 600 \times 0.07 \times (1/10) \times (1/7) + 1.4 \times 600 \times 0.55 \times (9/10) \times (1/7) = 67.8 \quad (4)$$

对于 y 轴电机,由于要克服重力,故在 y 轴没有移动的时候还会有 18A 的工作电流。取 y 轴电机的极端位置效率为 0.95,匀速运动时效率为 0.92,计算发热功率(单位:W)。

$$P_y = 32 \times 600 \times 0.05 \times (1/10) \times (1/7) + 18 \times 600 \times 0.08 \times (9/10) \times (1/7) = 124.8 \quad (5)$$

主轴电机一直在以相同的速度运转,本次仿真将主轴轴承的总生热率加到主轴电机上,将主轴电机和主轴轴承作为一个实体热源。主轴有 6 列轴承,每个轴承取发热功率 60 W。因而,主轴电机发热功率(单位:W)

$$P_{sp} = 7 \times 600 \times 0.22 + 60 \times 6 = 1\,284 \quad (6)$$

x 轴和 z 轴导轨都承受 2 t 的质量,故每根导轨承受 1 t 的质量。该机床导轨的运动副为滚动摩

擦,动摩擦因数为 0.005。因而摩擦力(单位:N)

$$f = 0.005 \times 1\,000 \times 10 = 50 \quad (7)$$

每个行程达到稳定运行速度 60 m/min 的时间,约占行程时间的 9/10。故每根导轨产生的热生成率(单位:W)

$$P = 50 \times 1 \times (9/10) \times (1/7) = 6.43 \quad (8)$$

滚动轴承的摩擦热主要是由于其摩擦力矩产生的,其发热量为

$$Q_f = 1.047 \times 10^{-4} n \cdot M \quad (9)$$

式中: n 为转速, r/min; M 为滚动轴承的摩擦力矩, M 与轴承类型、转速和润滑油性质有关,也与轴承所受负荷有关。

主轴轴承的转速为 2 500 r/min,结合轴承规格,主轴单列轴承的生热率约为 60 W,共有 6 列轴承。滚珠丝杠副的发热量和滚动轴承一样。

发热量无法作为热载荷直接加载到有限元模型,需要进一步求出热流密度, $q = Q/S$,则施加在丝杠上的热流密度(单位:W/m²)为

$$q = Q/S = 2.6/0.008 = 325 \quad (10)$$

式中 S 为螺母内滚道面积。

机床各部件材料的热力学性能如表 2 所示。

表 2 各部件材料的热力学参数

材料	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/m·K)	比热容/(J/kg·K)	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/C ⁻¹
HT300	7 300	50.24	502.43	110	0.28	1.1×10^{-5}
QT600-3	7 350	34.00	479.00	150	0.30	1.1×10^{-5}

1.2 温度场仿真结果与分析

机床热变形对其精度的影响贯穿机床从启动到稳定状态的整个过程,因此机床的温度场分析包括瞬态温度场和稳态温度场分析。本节利用有限元模型进行机床的瞬态和稳态温度场仿真,并分析其结果。

1) 稳态温度场

通过有限元仿真获得稳态温度场,提取整机稳态温度场如图 2 所示。

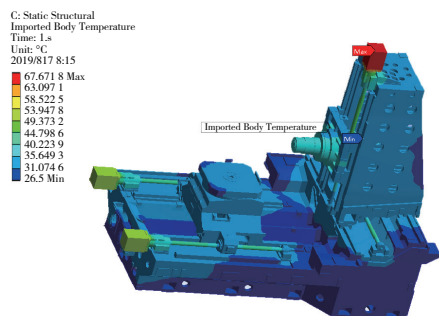


图 2 机床整机温度场云图(稳态)

由图 2 可知,电机的温度明显高于其他部件。由于 y 轴电机要克服重力做功,产生的热量比其他轴电机产生的热量多,故温度也为最高,靠近 y 轴电机的结构件温度也偏高。由于主轴带冷却系统,主轴电机处的温度比较均匀,从开机到停机,都处于 48 ℃ 左右。

从整机稳态温度场中摘取各轴向导轨的温度分布,发现导轨温度变化并不明显,主要原因是导轨运动副是滚动摩擦,摩擦因数低,导轨的生热率低。对比 3 个导轨的温度大小, y 轴导轨的温度要高于其他方向导轨,主要是由于 y 轴电机温度较高, y 轴电机与 y 轴导轨通过与空气的对流间接传热。

从整机稳态温度场中摘取各轴向丝杠的温度分布,发现丝杠整体温度要比室温高出 15 ℃ 左右。 y 轴丝杠最高温度区域出现在中部,这主要是由于主轴电机的影响。 x 轴和 z 轴丝杠受驱动电机影响,靠电机一侧温度较高。

2) 瞬态温度场

图 3 给出了机床整机的 4 个瞬态温度场分布

的代表性结果。

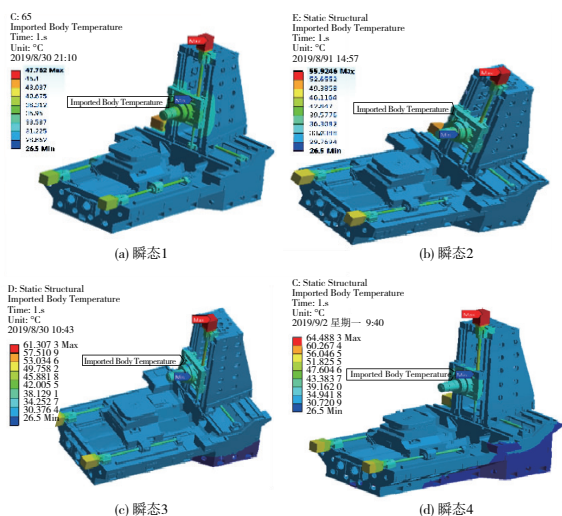


图3 机床瞬态温度场分布

对于瞬态温度场,作为功率负载的电机的温度(y 轴电机,分别为 47.8°C 、 55.9°C 和 61.4°C)都显著高于其他区域。此外,与 z 轴电机直接相连的传动部件(z 轴丝杠,分别为 37°C 、 41°C 和 44°C)和与主轴电机直接连接的主轴的温度也明显高出周围区域。从瞬态温度场1到瞬态温度场3,电机和与之连接的传动部件和主轴的温度逐渐升高,且电机的温升(y 轴电机, 13.6°C)大于与之连接的传动部件(z 轴丝杠, 7°C)和主轴。

上述温度场的动态变化特征表明,整机的重要热源为电机。在机床进入稳态工作状态过程中,电机的温度逐渐升高,并通过传热引起与之直接连接的传动部件和主轴的温升。

2 仿真模型实验验证

对机床进行温度场实验,通过温度场实验验证有限元仿真模型,检验模型中需要修正的部分^[18],为其可靠性提供实验数据支持。同时验证在运用有限元方法计算进给系统温度场时热源参数以及边界条件施加的合理性。

2.1 实验设备与实验条件

1) 实验设备

采用MT-X温度记录仪采集温度数据。该仪器由热电偶、光电开关、放大器、A/D、单片微机、显示器、存储器等组成。设备分辨率为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

2) 实验辅助设备

为了保证热电偶和测点的充分接触,使用钨硼磁铁,将测头扣在测点处。在布线过程中为使

热电偶线整齐,避免与运动部件干涉,使用扎带将松散的热电偶线固定。

3) 实验条件设置

机床的运行规律与仿真时设置相同,通过数控程序控制机床运行。

2.2 实验方案与测点布置

为了验证温度场仿真的正确性,首先验证热源(包括电机、导轨、丝杠、轴承),其次验证其他对加工误差影响较大的结构件(包括立柱底端所在平面)。

2.3 实验测量结果

以最大温度的95%为稳态温度,从开始记录温度到测点温度值达到稳态温度的时间为稳态时间,通过实验数据的分析可知,在该低速空载情况下该机床的稳态时间约为130 min。

测量初始环境温度为 28.5°C ,结束测量时环境温度为 31°C ; x 方向左侧导轨滑块(通道2)温度最大值 31.4°C ; x 方向右侧导轨滑块(通道5)温度最大值 30.9°C ; x 方向丝杠法兰盘从内向外温度最大值依次为 35.3°C (通道3)、 35.3°C (通道1)。

y 方向导轨上侧(通道4)温度最大值 33.5°C ; y 方向导轨下侧(通道7)温度最大值 31.2°C ; y 方向靠电机一端轴承座(通道8)温度最大值 43.2°C ; y 方向轴承座(通道6)温度最大值 32.3°C 。沿 x 正向看去, y 方向电机正侧(通道13)温度最大值 66°C ; y 方向电机右侧(通道9)温度最大值 66.6°C ; 立柱左下端正面(通道10)温度最大值 31.3°C ; 立柱左下端底面(通道11)温度最大值 32.2°C ; 立柱右下端正面(通道15)温度最大值 30.7°C ; 立柱右下端底面(通道16)温度最大值 30.8°C 。环境温度最大值 31.2°C (通道12)、 31.8°C (通道14)。如图4所示,通过实验测量验证了温度场有限元模型的准确性(本刊黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

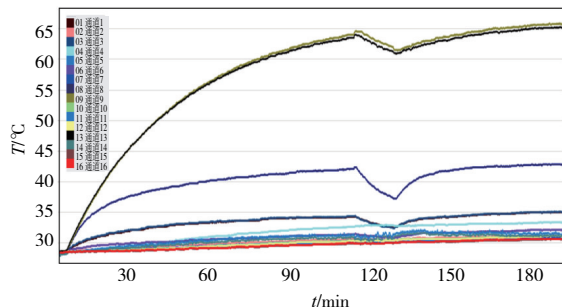


图4 卧式加工中心温度场实验数据

3 热偏移计算及热源贡献度分析

如图5所示,取5个瞬态时间节点的温度场,

综合分析主轴的热变形规律。选取主轴端面中心点为特征点,以初始状态和上述5个瞬态为时间节点,分析主轴的瞬态热变形过程。

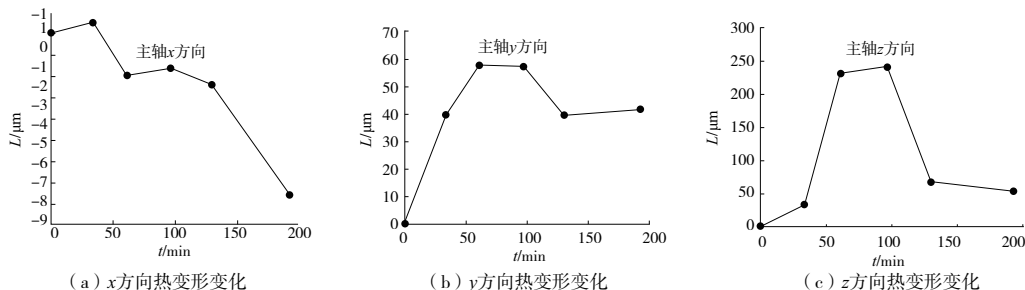


图5 主轴热变形变化过程

从图5可以看出,x方向变形量远小于其他方向的变形量,y方向和z方向热变形的趋势为先升后降。将各热源强度分别降低20%,依次计算出单因素变化下的温度场,以该温度场计算出主轴和工作台的热变形,并比较得出各热源对主轴

和工作台热变形的贡献度。经仿真计算可知,丝杠轴承的发热量对主轴和工作台的热变形影响很小,故不作考虑。选取特征点,定量计算各热源对主轴的贡献度,以扇形图形式展示如图6所示。

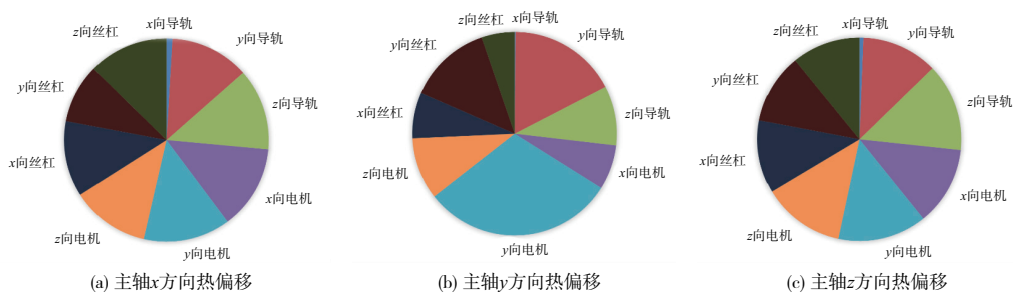


图6 各热源对主轴变形的贡献占比

比较占比统计结果,电机对温度场的影响显著,尤其y轴电机的温度变动对整体温度场都产生了影响;导轨对温度场影响较小;各热源改变下主轴热变形云图与实际工况下主轴热变形云图相比,y轴电机对主轴热变形的影响较大。

4 结语

本文从传热学基本理论入手,设置有限元温度场仿真基本参数,构建温度场仿真模型,并进行瞬态和稳态温度场仿真。制定具体的试验计划和方案,分步骤完成机床温度数据测量,通过温度场仿真结果和实验结果的对比来验证温度场仿真模型的准确性。进一步进行卧式加工中心热变形计算及分析。将温度场仿真数据以热载荷形式输入变形场,构建热变形仿真模型,进行热变形仿真。采用单因素法分析各热源温度变化量对主轴变形量的贡献度。发现y轴电机对主轴热偏移影响较大,各轴导轨影响较小。

参考文献:

- [1] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J, UHLMANN E, et al. Thermal issues in machine tools [J]. CIRP Annals, 2012, 61(2): 771-791.
- [2] YANG J, SHI H, FENG B, et al. Thermal error modeling and compensation for a high-speed motorized spindle [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5): 1005-1017.
- [3] WU H Y, GUAN Q, XI C F, et al. Construction of dynamic temperature field model of ball screw based on superposition of positive and negative temperature fields [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2023, 83(4): 343-360.
- [4] WU H Y, LI J J, LIU H X, et al. An analysis of heat source contribution and design of optimal cooling method for ball screw feed system [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2025, 38(2): 200-215.

(下转第91页)

- investigation on the machining performance of honeycomb seal structures by using electrochemical discharge machining [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 124: 226-239.
- [7] 王洪明. 航空发动机低压涡轮转子故障分析[J]. 装备机械, 2019(3): 62-64, 72.
- [8] 杨立光, 任连生, 王荣, 等. 蜂窝密封组件电火花加工工艺的研究[C]//2012年全国电火花成形加工技术研讨会交流文集. 北京: 北京迪蒙数控技术有限责任公司, 北京市电加工研究所, 2012: 82-85.
- [9] 陈飞. GH4169 高温合金激光-超声振动耦合辅助微铣削工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [10] 郑伟. 铣削镍基合金 Inconel718 时涂层刀具切削性能及失效机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [11] LÓPEZ DE LACALLE L N, PÉREZ J, LLORENTE J I, et al. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 100(1/2/3): 1-11.
- [12] LI X B, LIU X L, YUE C X, et al. Systematic review on tool breakage monitoring techniques in machining operations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 176: 103882.
- [13] FAN W, JI W, WANG L H, et al. A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(11): 2863-2879.
- [14] ZHAO G L, ZHAO B, DING W F, et al. Nontraditional energy-assisted mechanical machining of difficult-to-cut materials and components in aerospace community: a comparative analysis [J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(2): 022007.
- [15] 袁中行, 方斌, 李德芑. 超声振动辅助铣削研究进展[J]. 电加工与模具, 2020(2): 1-9, 18.
- [16] 杨阳. 超声辅助铣削钛合金曲面加工机理及试验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- [17] 冯真鹏. 超声辅助铣削镍合金铣削力和表面完整性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [18] 袁盛旺, 周何情. GH4169 高温合金超声辅助切削试验研究[J]. 工具技术, 2024, 58(6): 55-60.
- [19] 肖强, 冯真鹏, 刘锁强. 超声辅助铣削镍基高温合金铣削力建模及实验研究[J]. 制造技术与机床, 2023(11): 47-52.
- [20] 杨文龙, 谭延林, 罗剑锋. 超声振动辅助铣削镍基高温合金 GH4169 的切削性能研究[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(6): 34-41.
- [21] SUN J, LI P Y, ZHANG S, et al. Simulation and experimental study of ultrasonic vibration - assisted milling of GH4169 high - temperature alloy [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 73: 403-413.
- [22] SUÁREZ A, VEIGA F, DE LACALLE L N L, et al. Effects of ultrasonics - assisted face milling on surface integrity and fatigue life of Ni-alloy 718[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(11): 5076-5086.

收稿日期: 2025 - 02 - 25

(上接第 86 页)

- [5] 宋飞虎, 王梦柯, 尹静, 等. 基于数字孪生控制的精密机床热误差模型[J]. 机电工程, 2023, 40(3): 391-398.
- [6] 周琳丰. 面向缩短热机时间的数控机床主轴热误差快速辨识方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [7] 赵亮, 王孟超, 雷默涵, 等. 精密镗床进给轴差异化主动冷却方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 91-100.
- [8] 刘德行, 刘腾, 褚亚强, 等. 基于热-流-固耦合建模的精密机床主轴差异冷却策略优化[J]. 河北工业大学学报, 2023, 52(4): 16-23.
- [9] 尹静, 宋飞虎, 王梦柯, 等. 机床稳健性温度敏感点选择及热误差建模[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 162-167.
- [10] LU Y L, SHEVTSHENKO E, WANG Y. Physics-based compressive sensing to enable digital twins of additive manufacturing processes[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2021, 21(3): 031009.
- [11] 何全文, 刘刚, 庄凯, 等. 某型号立式加工中心主轴冷却器系统热流固耦合热态特性分析[J]. 机械工程师, 2023(8): 85-88, 92.
- [12] 李太松. 加工中心丝杠冷却结构的设计与试验[J]. 机械制造, 2022, 60(11): 45-48, 60.
- [13] 李毅, 陈国华, 夏铭, 等. 电主轴冷却系统设计与仿真优化[J]. 工程设计学报, 2023, 30(1): 39-47.
- [14] 马新朝. 单因素分析法在核电设备管道典型焊接问题处理流程中的应用[J]. 电焊机, 2023, 53(12): 126-132.
- [15] 陶文铨. 传热学[M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2024.
- [16] 周振涛. 电主轴热态特性与冷却优化建模研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [17] 王豪, 黄为彬, 方兵. 考虑结合面特性影响的机床整机有限元静力学分析模型[J]. 机电工程, 2024, 41(4): 732-738.
- [18] 孙浩雄. 虑及环境温度的精密卧加空间热误差仿真分析及测试方法[D]. 天津: 天津大学, 2023.

收稿日期: 2024 - 02 - 23