

引文格式: 杜彦斌, 李博, 杨潇, 等. 干切滚齿机床温度场特性辨识及分布优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 54-61.

DU Yanbin, LI Bo, YANG Xiao, et al. Characteristic identification and distribution optimization of temperature field of dry hobbing machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 54-61.

干切滚齿机床温度场特性辨识及分布优化*

杜彦斌, 李博, 杨潇, 何浪

(重庆工商大学制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067)

[摘要] 齿轮是航空航天等领域的重要基础件, 其加工质量受到机床热态特性等的影响。为探究绿色干切滚齿机床的热态问题, 提出一种多场耦合模拟和热成像重建相结合的温度场特性辨识方法。根据干切滚齿机床的多源热流特征分析, 建立结构-热-流体多物理场耦合的干切滚齿机床温度场仿真模型; 结合热像重建和仿真模拟分析, 揭示干切滚齿机床的温度场分布特性并确定其关键热敏部位; 在此基础上, 提出一种多维度的干切滚齿机床温度场分布优化策略。研究结果可为干切滚齿机床的热平衡设计和热误差补偿提供理论支撑。

关键词: 绿色制造; 干切滚齿机; 温度场; 多场耦合; 分布优化

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.054



杜彦斌

教授, 博士, 研究方向为机械装备再制造、装备可靠性分析等。

齿轮是航空航天、汽车、船舶、农业机械等制造业不可或缺的基础件^[1]。干切滚齿机床作为一种绿色的先进齿轮制造装备^[2], 具有生产效率高、单件加工成本低^[3]、车间环境危害小等优势^[4], 已成为齿轮加工行业绿色转型升级的重要发展方向^[5-6]。但干切滚齿机床运行时由于采用高速切削且无切削油冷却润滑, 导致产热量高于散热量, 热积聚效应十分显著, 是造成齿轮加工误差的主要因素^[7-8]。因此, 探究干切滚齿机床的热量流动规律及温度场分布特性, 对其热误差补偿和齿轮加工精度提升具有重要的理论与实践价值。

自 21 世纪以来, 干切滚齿机床的热问题长期受到国内外专家学者的广泛关注, 并重点对其热平衡调控方法和热误差补偿技术进行了研究, 取得了一些有价值的成果^[9-10]。文献 [11] 提出了一种基于热力学模型的干切滚齿机床热平衡调控方法, 可使加工区域的温度变化范围在机床

持续运行过程中保持恒定。文献 [12] 建立了考虑切屑传热效率的干切滚齿机床热平衡优化模型, 使得切削空间的平均温升最小。文献 [13] 利用所构建的干切滚齿机床热变形测试系统, 获得了机床热变形规律与齿向误差的轨迹曲线。文献 [14] 建立了基于齐次坐标变换的干切滚齿机床热变形误差模型, 揭示了机床部件热变形对整机热变形误差的影响机制。文献 [15] 建立了干切滚齿机床-工件的热误差协同补偿模型, 可对机床和工件的热变形误差进行同步补偿。不难发现, 现有文献报道经常凭借主观经验设定测温传感器的放置位置和数量, 以验证分析相关热误差补偿或热平衡调控方法。该方法主要依赖工程经验, 较为缺乏理论依据, 存在热变形调控精度受限等问题。

鉴于此, 本研究以国产某干切滚齿机床为例, 通过分析干切滚齿机床多源热流特征, 建立干切滚齿机床多场耦合数值仿真模型, 并结合利用多

* 基金项目: 国家自然科学基金(51905059); 国家重点研发计划项目(2020YFE0201000); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0205); 重庆市高校创新研究群体资助项目(CXQT21024); 重庆市教委科学技术研究计划(KJQN201800839)。

过机床结构材料设置、热源加载以及流体参数设置等,构建结构-热-流体耦合的干切滚齿机床温度场仿真模型。

2.3.1 结构材料设置

干切滚齿机床的结构参数详见其技术手册。根据汽车变速箱倒挡齿轮性能需求,待加工齿轮材料为20CrMOH(材料系数为1.35)。对于干切滚齿机床,车间统计发现,电机、轴承分别设置为镁铝合金和9Cr18材料,机床立柱、床身等架构件为HT250铸铁,工作台、丝杠以及导轨等为45钢,对于干切滚刀,其基体材料为S390,涂层材料为TiAlN,结合金属材料手册获得机床材料属性如表2所示,进而可对机床材料属性进行设置。

2.3.2 热源施加

结合上文的热源分析,确定各热源的数值。根据电机学理论,电机的发热量利用式(1)计算^[17],即

$$Q_m = P_m (1 - \eta_m) = \left(\frac{M_m n_m}{9550} \right) \left(\frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \right) \quad (1)$$

式中, Q_m 为电机产热量, W; P_m 为电机输入功率, W; η_m 为电机效率; M_m 为电机输出力矩, N·mm; n_m 为电机转速, r/min。

轴承的发热量可利用 Palmgren 摩擦力矩经验公式式(2)计算^[18],其中摩擦力矩按式(3)计算。由于工程中常将滚珠丝杠所受载荷等效于向心推力球轴承的载荷,因此可按轴承发热公式对滚珠丝杠发热进行计算,但摩擦力矩需按式(4)计算。

$$Q_f = 1.047 \times 10^{-4} n_b \cdot M \quad (2)$$

$$M = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (v n_b)^{2/3} D_m^3 + f_1 P_1 D_m, & v n_b \geq 2000 \\ 1.6 \times 10^{-5} f_0 D_m^3 + f_1 P_1 D_m, & v n_b < 2000 \end{cases} \quad (3)$$

式中, Q_f 为轴承产热量, W; n_b 为轴承转速, r/min; M 为摩擦力矩, N·mm; f_1 为与轴承结构和所受载荷相关的系数; P_1 由轴承所受载荷确定; D_m

为轴承中径; f_0 为与轴承结构和润滑方式有关的系数; v 为轴承润滑油的运动黏度, mm²/s。

$$M = \frac{0.9 F_b P}{2\pi \eta_b} (1 - \eta_b^2) + \frac{T}{\eta_b} \quad (4)$$

式中, P 为丝杠导程, mm; T 为电机转矩, N·mm; η_b 为滚珠丝杠的传动效率; F_b 为滚珠丝杠的轴向预紧力。

导轨以摩擦生热为主,产热量可用式(5)计算^[19],即

$$Q_g = \mu_k W g v_g / J \quad (5)$$

式中, Q_g 为发热量, Cal/s; μ_k 为动摩擦因数; W 为摩擦面上的负载, kg; g 为重力加速度, 10m/s²; v_g 为动、静导轨的相对滑动速度, m/s; J 为热功当量, 为 4.2J/Cal。

对于切削热,由于滚切所需能量的 98%~99% 均转变成切削热,结合干切滚齿中的切削线速度与主轴转速之间的函数关系,有

$$Q_c = F_c \frac{\pi d_h n_h}{60} \quad (6)$$

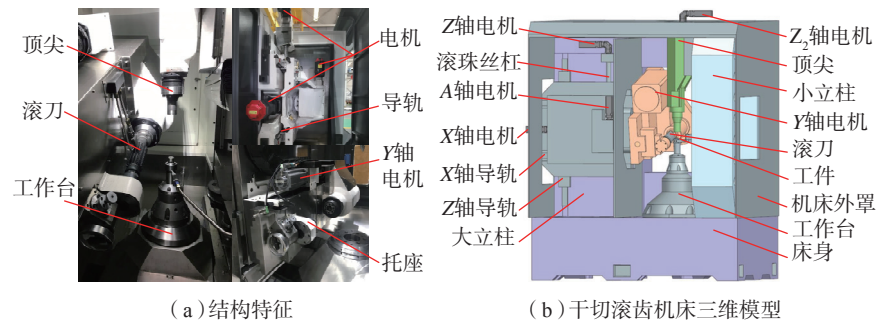


图2 干切滚齿机床实体模型
Fig.2 Solid model of dry hobbing machine

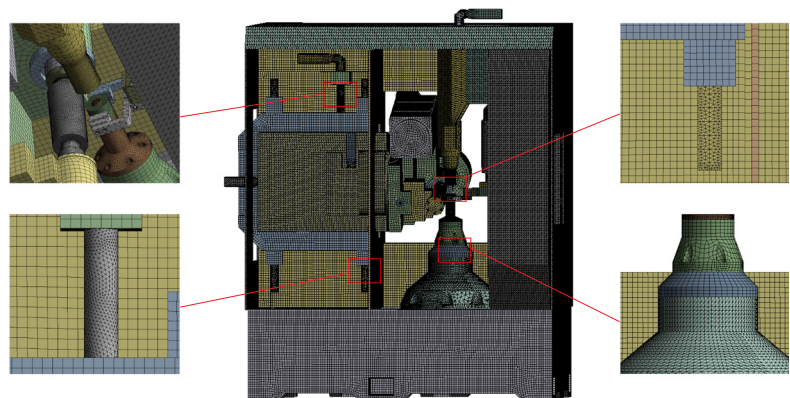


图3 干切滚齿机床网格模型
Fig.3 Mesh model of dry hobbing machine

表2 材料热物性参数

Table 2 Material thermophysical parameters

材料名称	密度 / (kg·m ⁻³)	热导率 / (W·mm ⁻¹ ·K ⁻¹)	辐射系数	比热容 / (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
9Cr18	7750	0.0293	0.85	450
HT250	7150	0.0530	0.63	500
镁铝合金	2680	0.1380	0.55	963
45钢	7850	0.0520	0.79	450
S390	8400	0.0810	0.60	460
20CrMOH	7840	0.0440	0.82	460

式中, Q_c 为切削热的生产率, J/s; F_c 为主切削力, N; n_h 为滚刀转速, r/min; d_h 为滚刀直径, m。

主切削力 F_c 可根据德国普发特公司提出的式(7)求得^[20],即

$$F_c = \frac{20000m^{0.95}S^{0.8}a_p^{0.15}e^{0.012\beta}C_g}{V_c^{0.28}i^{0.7}A^{0.6}} e^{0.65z\chi - 0.35} C_w \quad (7)$$

式中, β 为齿轮螺旋角; m 为齿轮法向模数, mm; C_w 为齿轮材料系数; z 为齿轮齿数; χ 为齿轮修正系数, 若为标准齿轮, 则 $\chi=0$; A 为滚刀系数, $A=r/m$, 其中 r 是滚刀半径, mm; i 为滚刀槽数; C_g 为滚刀头数系数; a_p 为滚切深度, mm; S 为滚刀轴向进给量, mm/r。

通过代入相关参数, 利用式(1)可得主轴电机产热量为 2894.85W, 其他电机为 674.43W; 各轴承产热量可通过式(2)和(3)计算, 并以内生热载荷的形式施加至零部件。各丝杠、导轨的产热量分别以式(2)、(4)和(5)计算; 根据切削热式(6)~(7)计算得出切削热为 6832.82W 以后, 结合工厂经验按 5% 和 3% 的切削热分别传入干切滚刀和工件进行计算, 即 341.64W、204.98W, 均以热通量载荷形式施加至工件表面。同时, 按照零部件的材料属性分别设置辐射系数, 环境温度设置为 22℃。

2.3.3 流体参数设置

干切滚齿机床运行时涉及流体流动换热, 包括车间空气与机床的自然对流和压缩空气与切削区的强迫对流。空气自然对流换热系数根据工程经验取 $10W/(m^2 \cdot K)$, 强迫对流按照传热学原理由式(8)和(9)确定其换热量。代值计算得出, 压缩空气的强制对流换热系数为 $152.1W/(m^2 \cdot K)$, 以热对流载荷形式添加至滚刀和齿轮表面, 并根据主轴、工作台等受到冷却气体影响程度的不同, 对其受到压缩空气的强制对流换热系数设置进行相应调整。同

时, 对各零部件表面插入热流载荷, 实现零部件间热对流和热辐射引起的热量传输^[21]。

$$h = \frac{\lambda C Re^b Pr^{1/3}}{L} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\nu_a} \quad (9)$$

式中, h 为滚刀表面的强制对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; L 为滚刀表面特征尺寸, m; λ 为压缩气体热传导系数, $W/(m^2 \cdot K)$; C 和 b 为常数; Re 、 Pr 分别为雷诺数和普朗特数; ν_a 为压缩气体动力黏度, $kg/(m \cdot s)$; v 为压缩气体流速, m/s; ρ 为压缩气体密度, kg/m^3 。

3 干切滚齿机床温度场分布特性及优化

3.1 仿真分析的有效性验证

为验证上述多场耦合仿真分析结果的有效性, 采用 Fluke Ti32 红外热像对干切滚齿机床的温度场进行重建, 此过程中的机床运行参数与仿真所用参数一致。图 4(a) 为仿真获得的温度场云图, 图 4(b) 为热像重建的整机及部组件的温度场云图。

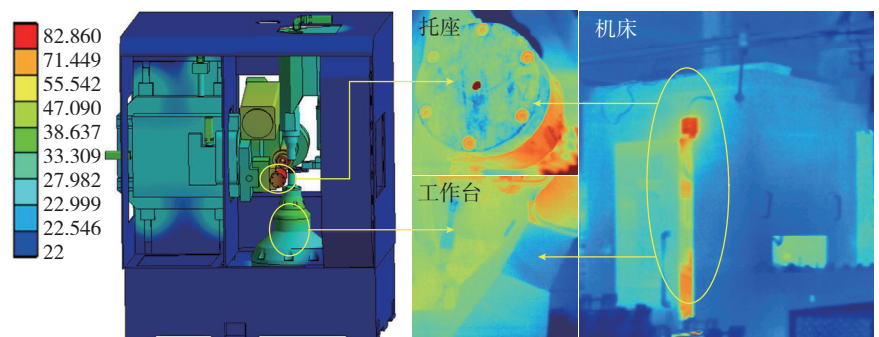
在仿真结果中, 机床切削加工空间内的温度上升较大, 尤其是滚刀主轴托座和工作台表面, 而越靠近机床外壳的地方则升温越小, 几乎接近室温。在热像重建中, 整机温度场云图表明高温部位在机床切削加工空间内, 而机床外壳温度同样与室温相

近; 部组件的温度场云图则表明滚刀主轴托座和工作台表面的温升较大。两种方式下温升趋势具有相似性, 表明该仿真分析具有一定的可靠性。

为进一步探究干切滚齿机床部组件的温度变化特性, 通过对比仿真和热像重建两种方式下的部组件局部平均温度, 得到如图 5 所示的温升趋势图。可见, 干切滚齿机床中, 温度变化显著的部件是主轴托座和工作台, 随后则为导轨、床身和立柱。两种方式得到的干切滚齿机床关键部组件温升趋势基本一致, 也进一步表明该仿真分析的有效性。

3.2 机床温度场分布特性

通过多场耦合仿真, 可得如图 6 所示的部组件温度场云图。图 6(a) 为干切滚刀主轴的温度分布趋势: (1) 主轴两端轴承高速旋转使得产热量大, 但密闭的轴承端盖导致散热条件差, 从而使得主轴两端温度较高; (2) 主轴电机发热也加剧刀杆温度上升; (3) 干切滚刀表面温度高, 其原因在于高速和干切削使得切削热的产生量大, 一些来不及被切屑带走的热量最终流入干切滚刀, 不断积聚的热量最终使得干切滚刀温度显著上升。多方面因素的共同作用使得主轴温度较大上升, 是影响主轴误差的重要因素。图 6(b) 为工作台的温度场云图。受内置驱动电机和高温切屑等的影响, 工作台呈现非均匀性的温度分布。由于高温切屑掉



(a) 仿真获得的温度场云图

(b) 热像重建的整机及部组件温度场云图

图4 仿真和热像温度场对比

Fig.4 Comparison of temperature field between simulation and thermal image

落时更易在靠近干切滚刀主轴的一侧堆积,从而导致此处温度相对较高。因此,工作台倾斜角度优化设计对于降低其热变形具有重要的实践意义。

进给系统的温度场如图6(c)所示。可见,进给系统的主要发热点在丝杠和导轨附近,温度最高可达30.412℃,且X轴进给系统导轨Ⅱ处受到干切滚刀主轴传热影响而发生升温,使得方向不同的进给轴在温度峰值和变化趋势上具有一定差异。不同于湿切滚齿机床的左右对称式立柱布局结构,干切滚齿机床立柱呈偏置式安放在床身上,由于立柱上的导轨摩擦和Z轴电机托座的热传递,使得立柱高温部位处于大立柱左侧,如图6(d)所示。受部分高温切屑堆积、工作台及切削区等传热影响,床身温度分布也具有非均匀性(图6(d)),其中与工作台连接处的温度变化最为明显,此处最高温度达29.711℃。

相比于干切滚刀主轴、工作台以及进给系统等,立柱和床身的温升较小,其原因在于两者体积庞大。此类高温区域即为干切滚齿机床的热敏感部位,应为其热误差建模与补偿时的重要温升参考点,有助于提高补偿精度。本研究进一步利用热电偶传感器,对车间运行中的干切滚齿机床进行温升测试,所得到的关键部组件的温升曲线如图7所示。各部位的温度随着加工进程的推进呈现出先急剧上升然后趋于平衡的变化趋势,但仍以干切滚刀主轴的温度最高,工作台次之,立柱和床身温升较小,与上述分析结果一致。

3.3 温度场分布优化策略

系统考虑机床结构、工艺参数以及热流管控在机床温度场分布方面的影响作用,提出一种多维度的干切滚齿机床温度场分布优化策略,如图8所示。

在机床结构维度上,构建切屑安息角优化设计方法,具体建立切屑飞

出速度、切屑于工作台滞留时间 t 、安息角 α 以及表面摩擦系数 μ 等参数之间的数学模型,并结合工作台空间几何结构约束和机床切削能力范围等,以工作台累积吸收热量最少为优化目标,利用智能算法寻优以获取最佳切屑安息角,从而为干切滚齿机床结构优化设计提供理论依据。

在工艺参数维度上,结合产-散热时变规律建立干切滚齿机床的动态

热平衡模型,形成以机床部组件温升最小为目标,以干切滚刀转速、冷却气换热能力等为调控变量,以切屑滞留时长短、齿轮加工质量、运动轴速度区间等为约束条件的干切滚齿机床热平衡调控方法,实现温度场分布优化。

在智能管控维度上,利用智能传感技术实时采集机床温敏点的温度和热变形信息,通过奇异值分解消除所采集的连续数据流的噪点,在此基

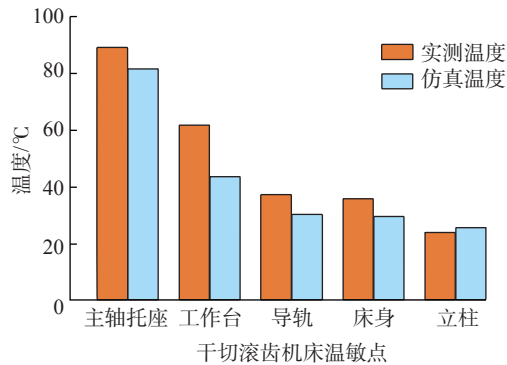


图5 关键部组件的温升趋势
Fig.5 Temperature rise trend of key components

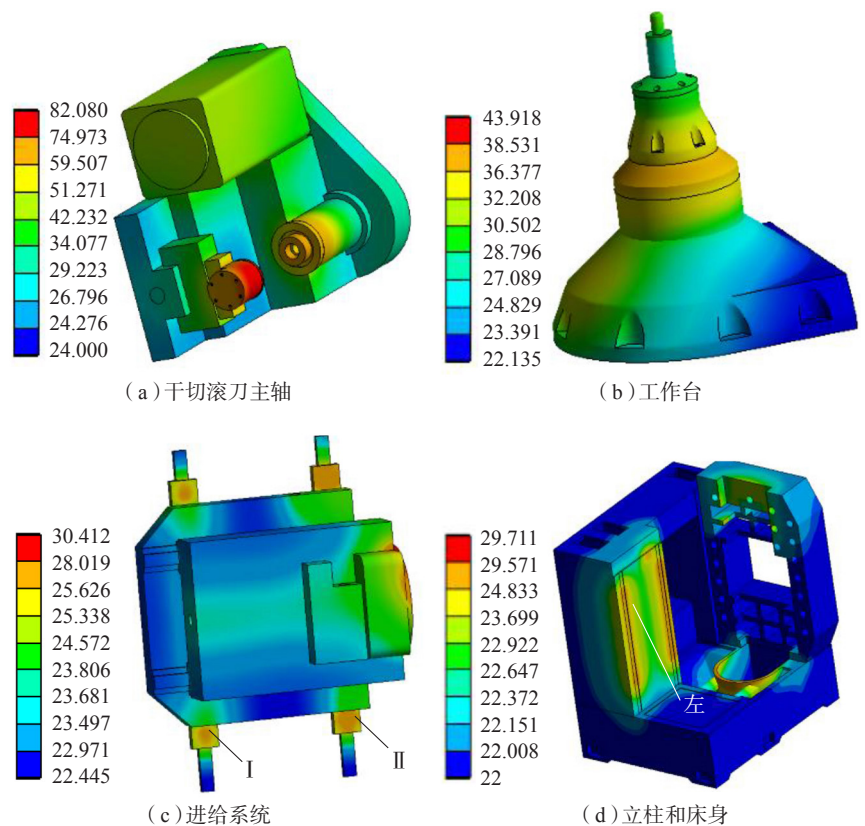


图6 关键部组件的温度场云图
Fig.6 Cloud map of temperature field of key components

础上通过机床温敏点热态判据实时发出反馈控制信号,然后结合干切滚齿机床热平衡调控获得最优参数集,从而对工艺参数进行自适应控制。

通过结构、工艺参数以及在线管控多维度结合,实现干切滚齿机床温度场的分布优化。其中,结构维度上的切屑安息角优化设计,可减少切屑

工作台表面的滞留时间,从而使切屑带走更多切削热,达到减少机床热变形的目的。而将切屑换热能力(由切屑滞留时间和单位时间内的切屑换热能力决定)最大化,作为工艺参数维度中的热平衡调控约束之一,可在降低高温切屑堆积所导致的机床热变形风险的同时实现温度场分布优化,进一步将热平衡调控所得的最优工艺参数集用于管控维度,对机床温度场分布进行实时地智能管控。基于以上3个维度对干切滚齿机床温度场进行协同调控,结合机床结构设计和干切滚齿加工工艺参数的优化,改善机床整体温度场分布均匀性;通过干切滚齿加工工艺参数的优化

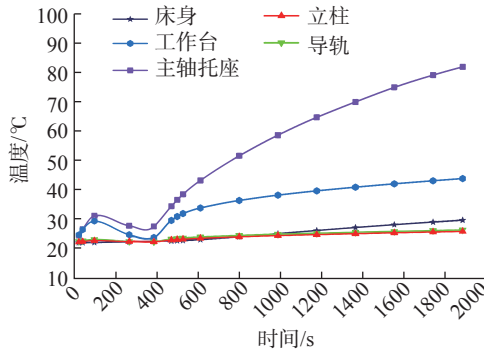


图7 关键部组件瞬态升温曲线

Fig.7 Transient temperature rise curve of key components

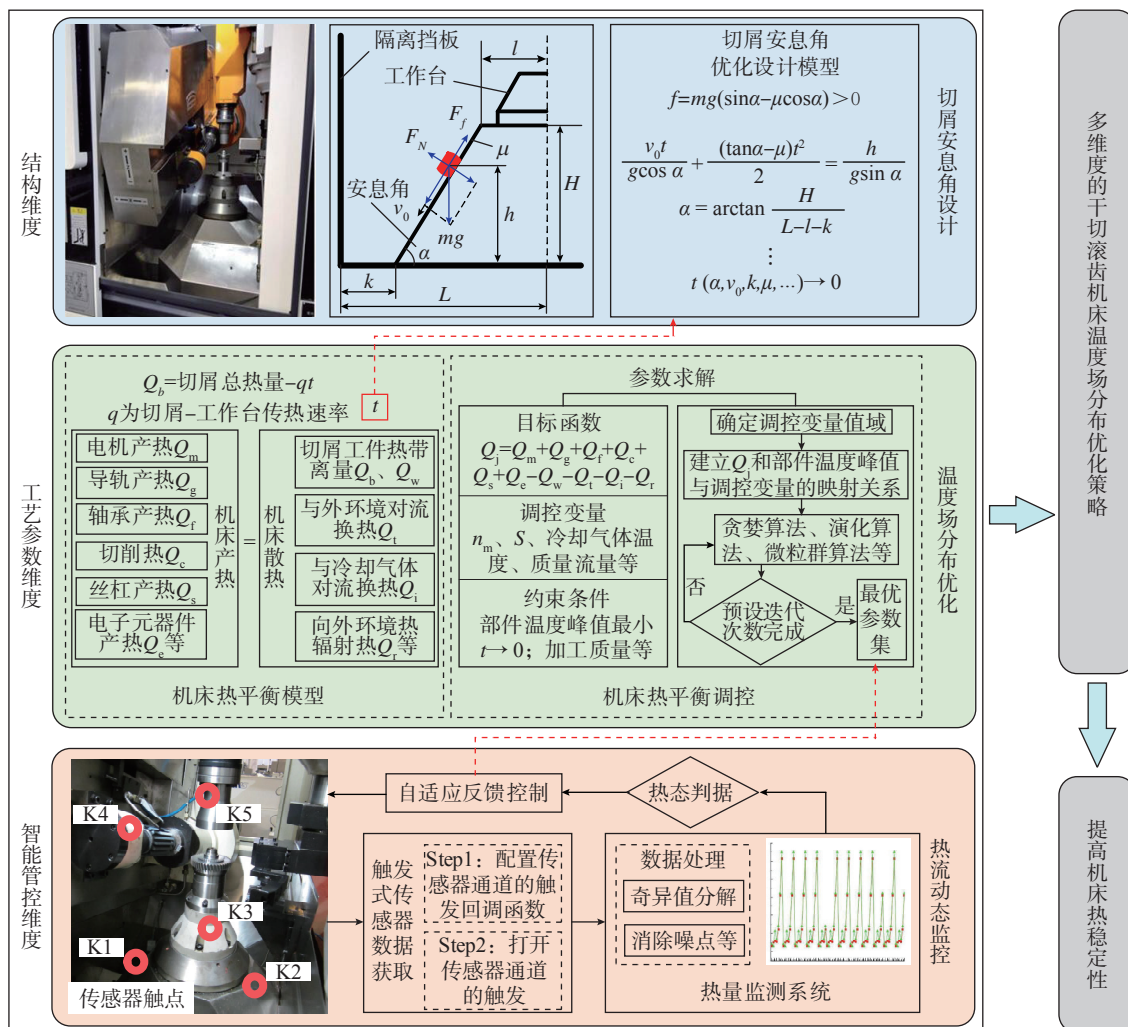


图8 温度场多维度分布优化

Fig.8 Multi-dimensional distribution optimization of temperature field

和机床热流的智能管控,使得机床温度场分布优化具有实时性,增强机床热平衡调控效果,从而提高齿轮加工质量。

4 结论

为探究绿色干切滚齿机床的热敏感性,本研究提出了多场耦合模拟和热成像重建相结合的温度场分布特性辨识方法,所取得的研究结论包括以下3个部分。

(1) 根据干切滚齿机床的整体结构分布特点对其多源热流特征进行了分析归纳,并建立了结构-热-流体多物理场耦合和热像重建相结合的干切滚齿机床温度场仿真模型,为其热敏特性分析提供了支撑。

(2) 对干切滚齿机床的结构-热-流体多物理场耦合的温度场进行了热像重建和仿真模拟分析,揭示了干切滚齿机床的温度分布特性及主要热敏点。

(3) 提出了干切滚齿机床温度场多维度的分布优化策略,从机床结构、工艺参数及热流管控3个维度为整机热平衡调控奠定了分析基础。但是目前还未对干切滚齿机床多维度热平衡调控和热误差补偿的效果进行深入分析,尤其是多个维度之间的协同效应,未来工作将进一步开展温度场分布优化的定量研究,为提高干切滚齿机床热态精度提供支撑。

参考文献

[1] TROB N, BRIMMERS J, BERGS T. Tool wear in dry gear hobbing of 20MnCr5 case-hardening steel, 42CrMo4 tempered steel and EN-GJS-700-2 cast iron[J]. *Wear*, 2021, 476: 203737.

[2] 刘艺繁, 阎春平, 倪恒欣, 等. 基于GABP和改进NSGA-II的高速干切滚齿工艺参数多目标优化决策[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(9): 1043-1050.

LIU Yifan, YAN Chunping, NI Hengxin, et al. Multi-objective optimization decision of high-speed dry hobbing process parameters

based on GABP and improved NSGA-II[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(9): 1043-1050.

[3] SARI D, TROB N, LÖPENHAUS C, et al. Development of an application-oriented tool life equation for dry gear finish hobbing[J]. *Wear*, 2019, 426-427: 1563-1572.

[4] 李本杰, 曹华军, 杨潇, 等. 高速干切滚齿工艺切削形变规律及其对刀具的损伤行为[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(1): 71-78.

LI Benjie, CAO Huajun, YANG Xiao, et al. Contribution of chip deformations and crushes to tool failures in high-speed dry gear hobbing[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(1): 71-78.

[5] 倪恒欣, 阎春平, 陈建霖, 等. 高速干切滚齿工艺参数的多目标优化与决策方法[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(7): 832-838.

NI Hengxin, YAN Chunping, CHEN Jianlin, et al. Multi-objective optimization and decision-making method of high speed dry gear hobbing processing parameters[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(7): 832-838.

[6] 陈世平, 刘状, 闫文, 等. 干切滚齿机热变形误差模型及其误差补偿技术研究[J]. *制造技术与机床*, 2019(11): 119-124.

CHEN Shiping, LIU Zhuang, YAN Wen, et al. Study on thermal deformation error model and compensation technology of dry-cutting hobbing machine[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019(11): 119-124.

[7] 陈永鹏, 曹华军, 杨潇. 高速干切滚齿工艺滚刀切削刃载荷分布特性研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(15): 181-187.

CHEN Yongpeng, CAO Huajun, YANG Xiao. Research on load distribution characteristic on the cutting edge in high speed gear hobbing process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(15): 181-187.

[8] 杨潇, 曹华军, 陈永鹏, 等. 高速干切滚齿工艺系统切削热全过程传递模型[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(19): 189-196.

YANG Xiao, CAO Huajun, CHEN Yongpeng, et al. Whole process cutting heat transfer model for high-speed dry hobbing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(19): 189-196.

[9] LI X G, YANG Y, ZOU Z, et al. Critical study on the thermal-structural characteristics of worktable assembly of a dry

hobbing machine[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(1-4): 179-188.

[10] ZOU Z, YAN W, MA W S, et al. Development of thermal error mapping model for the dry gear hobbing machine based on CNN-DAE integrated structure and its application[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(7-8): 2343-2354.

[11] 朱利斌, 曹华军, 黄海鸿, 等. 干切滚齿机床压缩空气冷却系统热力学模型及热平衡调控方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5): 204-211.

ZHU Libin, CAO Huajun, HUANG Haihong, et al. Air cooling system thermodynamic analysis and thermal balance control of dry cutting machine tool[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(5): 204-211.

[12] YANG X, CAO H J, LI B J, et al. A thermal energy balance optimization model of cutting space enabling environmentally benign dry hobbing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 2323-2335.

[13] WANG S L, YANG Y, LI X G, et al. Research on thermal deformation of large-scale computer numerical control gear hobbing machines[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(5): 1393-1405.

[14] 陈永鹏, 曹华军, 李先广, 等. 高速干切滚齿机床热变形误差模型及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(7): 36-42.

CHEN Yongpeng, CAO Huajun, LI Xianguang, et al. Study on modeling and experiment of thermal deformation error for high-speed dry hobbing machine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7): 36-42.

[15] CAO H J, ZHU L B, LI X G, et al. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5-8): 1739-1751.

[16] FU G Q, TAO C, XIE Y P, et al. Temperature-sensitive point selection for thermal error modeling of machine tool spindle by considering heat source regions[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(9-10): 2447-2460.

[17] 邓小雷, 戴温克, 周翎飞, 等. 数控机

床主轴-立柱系统热态特性分析与测试[J]. 光学精密工程, 2020, 28(3): 601-609.

DENG Xiaolei, DAI Wenke, ZHOU Lingfei, et al. Thermal characteristics analysis and test of spindle-column system for CNC machine tool[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(3): 601-609.

[18] ZHOU H, FAN K G, GAO R. Fast heat conduction-based thermal error control technique for spindle system of machine tools[J]. The International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, 2020, 107(1-2): 653-666.

[19] 刘国顺, 林宪旗, 张文亮, 等. 基于ANSYS的直线导轨热变形分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(7): 160-163.

LIU Guoshun, LIN Xianqi, ZHANG Wenliang, et al. Thermal deformation analysis of linear guide rail based on ANSYS[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(7): 160-163.

[20] 于春建, 黄筱调. 滚齿切削力计算方法分析[J]. 工具技术, 2007, 41(3): 42-45.

YU Chunjian, HUANG Xiaodiao. Analysis of calculating methods for hobbing force[J]. Tool Engineering, 2007, 41(3): 42-45.

[21] 焦瑶, 孙立剑, 洪海波, 等. 超精密光学磨床减小热误差的结构优化[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 167-175.

JIAO Yao, SUN Lijian, HONG Haibo, et al. Material thermal conductivity determination and structure optimization of ultra-precision optical machine tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 167-175.

Characteristic Identification and Distribution Optimization of Temperature Field of Dry Hobbing Machine

DU Yanbin, LI Bo, YANG Xiao, HE Lang

(Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

[ABSTRACT] Gears are important basic parts in aerospace and other fields, as well as their processing quality is affected by the thermal characteristics of the machine tool. In order to explore the thermal state of the green dry hobbing machine, an identification method of temperature field characteristic combining multi-field coupling simulation and thermal imaging reconstruction is proposed. Based on the characteristics analysis of the multi-source heat flow of the dry hobbing machine, the temperature field simulation model of the dry hobbing machine with the coupling of structure-heat-fluid multiphysics is established. Then, combining thermal image reconstruction and simulation analysis, the temperature field distribution characteristics of dry hobbing machine are revealed and its key thermally sensitive parts are determined. On this basis, a multi-dimensional optimization strategy for temperature field distribution of dry hobbing machine is proposed. The results can provide theoretical support for the thermal balance design and thermal error compensation of dry hobbing machine.

Keywords: Green manufacturing; Dry hobbing machine; Temperature field; Multi-field coupling; Distribution optimization

(责任编辑 古彦)