DOI:10.11784/tdxbz202506039

铣车复合加工中心温控源关键参数设计方法

刘　宏[1]，田文杰[1,2]，张大卫[2]，高卫国[2]，蔡春刚[3]，陈　虎[3]
（1. 天津大学海洋科学与技术学院，天津 300072；
2. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室，天津 300350；
3. 科德数控股份有限公司，大连 116085）

摘　要：热误差是影响精密数控机床加工精度的重要因素. 除了热平衡设计、热误差补偿之外，主动温控技术是保障机床热稳定性、减小热误差的又一有效手段，其可通过在机床结构件表面或内部设置温控回路，采用多回路、差异化的主动闭环温度场控制策略，实时调控整机温度场分布状态和热变形状态，从而抑制机床热变形，提高整机热精度和热稳定性. 然而，目前在机床热误差主动温控过程中尚缺乏对于主动温控源关键参数的系统性分析与设计方法. 针对现有数控机床主动温控方法中主动温控源安装位置参数及功率特性关键参数匹配设计难题，以 KTX1250TC 型号五轴卧式铣车复合加工中心为研究对象，研究了机床内生热源和主动温控源作用下整机温度场分布状态及结构件热变形规律，揭示了主动温控源功率特性关键参数对进给轴运动部件热致位姿误差的影响规律；进而采用神经网络拟合方法建立了主动温控源安装位置关键参数与进给轴热致运动误差间的定量映射模型；最后以进给轴运动部件综合热误差最小为目标，提出了主动温控源位置与功率参数的联合优选方法，为主动温控系统与机床间的匹配设计提供理论依据. 结果表明，所提方法可使进给轴的综合热误差降低约 60%，有效调控了整机的热精度，为主动温控技术在工程中的应用提供了技术支撑.

关键词：铣车复合加工中心；热误差；温度场；主动温控技术
中图分类号：TG156　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0493-2137（2026）11-1166-10

Design Method for Key Parameters of Temperature Control Source for Milling-Turning Composite Machining Center

Liu Hong[1]，Tian Wenjie[1,2]，Zhang Dawei[2]，Gao Weiguo[2]，Cai Chungang[3]，Chen Hu[3]
（1. School of Marine Science and Technology，Tianjin University，Tianjin 300072，China；
2. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education，Tianjin University，Tianjin 300350，China；3. Kede CNC Co.，Ltd.，Dalian 116085，China）

Abstract：Thermal error is an important factor affecting the machining accuracy of precision CNC machine tools. In addition to thermal balance design and thermal error compensation，the active temperature control technology is another effective means to ensure the thermal stability of machine tools and reduce thermal errors. It can suppress the thermal deformation of the machine tool，improve the thermal accuracy and stability of the whole machine by setting tem-perature control circuits on the surface or inside of the machine tool structural components，adopting a multi-loop，differentiated active closed-loop temperature field control strategy，and real-time control of the temperature field dis-tribution and thermal deformation status of the whole machine. However，there is currently a lack of systematic analysis and design methods for key parameters of active temperature control sources in the active temperature control process of machine tool thermal errors. In response to the difficult problem of matching the key parameters of the in-stallation position and power characteristics of the active temperature control source in the existing active temperature control methods for CNC machine tools，the KTX1250TC five-axis horizontal milling-turning composite

收稿日期：2025-06-29；**修回日期**：2025-08-17.
作者简介：刘　宏（2002—　　），男，硕士研究生，2024227033@tju.edu.cn.
通信作者：田文杰，wenjietian@tju.edu.cn.
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2022YFB3402004）.
Supported by the National Key Research and Development Program of China（No. 2022YFB3402004）.

machining center was taken as the research object. The distribution of the temperature field of the entire machine and the thermal deformation law of structural components under the action of the internal heat source and active temperature control source of the machine tool were studied, and the influence law of the key parameters of the power characteristics of the active temperature control source on the thermal-induced pose error of the feed axis moving parts was revealed. Furthermore, a quantitative mapping model was established between the key parameters of the installation position of the active temperature control source and the thermal motion error of the feed axis using neural network fitting method. Finally, with the goal of minimizing the comprehensive thermal error of the feed axis moving components, a joint optimization method for the position and power parameters of the active temperature control source was pro-posed, providing a theoretical basis for the matching design between the active temperature control system and the machine tool. The results show that the proposed method can reduce the comprehensive thermal error of the feed shaft by about 60%, effectively regulate the thermal accuracy of the whole machine, and provide technical support for the application of active temperature control technology in engineering.

Keywords: milling-turning composite machining center; thermal error; temperature field; active temperature control technology

机床内外部热源引起的结构热变形，是影响机床加工精度的重要因素. 早在 20 世纪 30 年代初，瑞士学者首先发现了机床结构热变形与零件的加工精度之间的相互影响[1]. 此后，Bryan[2]指出环境热源、主轴、进给系统及切削产生的热量会通过热传导、热对流和热辐射的方式影响机床的温度场，最终造成刀具和工件间的相对位姿变化. 研究和生产实践表明，热致误差在加工制造误差中占比可达 60% ~ 75%[3]，其建模与补偿对于提高机床加工精度至关重要[4]. 在通过理论或经验方法建立整机热误差模型的基础上，结构热平衡设计、热误差补偿及主动温度场控制是减小或抑制热误差的主要途径.

结构热平衡设计主要指结构对称或热源对称设计，可从源头上减小热误差. 日本学者提出了“热亲和”的概念[5]，旨在通过优化机床结构减少热量的产生和分布的不均匀性，同时利用热变形规律合理改进结构布局，减小热变形对加工精度的影响. Liang 等[6]利用有限体积单元法分析了机床关键结构的热特性，并基于位移分解与反作用方法设计了新的热平衡结构以减少机床热误差. 但机床结构复杂且相互制约，热工况多样且时变，难以实现完全的热平衡设计.

热误差补偿基于热误差模型和实测数据预测单轴或整机空间热误差，并通过修正数控系统指令提升热精度. 杜正春等[7]系统阐述了数控机床的热误差形成机理、传递模型建模方法、检测技术及误差实时补偿控制软硬件系统等内容，并开展了实验验证. 刘阔等[8-9]在直线进给轴误差成因分析、丝杠热变形机理研究的基础上，采用数据驱动与机理驱动方法建立了进给轴热误差模型并实施补偿. Jia 等[10]提出的一维卷积神经网络模型可以替代传统的温度敏感点选择（temperature-sensitive point selection，TPS）方法实现热误差的预测. 此外，数字孪生、神经网络、时空特征交互融合等方法也在热误差建模与补偿方面得到应用[11-13]. 热误差补偿作为一种事后补偿手段，如何适应机床工况变化及环境温度波动等特点，仍是有待深入研究的技术问题.

主动温度场控制是指通过多回路、差异化的主动闭环温度场控制，精准控制机床整体温度场分布的方法[14]. 与传统的恒温控制或室温同调被动冷却技术相比，该方法可满足机床对温控能力的动态调整的需求. Mitsuishi 等[15]较早提出了机床主动温控的理念和方法，发明了由电热器、散热片箱、风扇构成的热交换设备，通过传感器实时获取温度，主动控制立柱结构热变形. 此后，国内外学者围绕该技术路线开展了广泛的研究.

在功能部件主动温控方面，Li 等[16]提出了一种基于可变滞后阶数的分段建模方法，有效补偿了齿轮磨床主轴系统的热误差. Zhang 等[17]提出了针对电主轴的差异化主动温控方案，使比例-积分-微分（proportional-integral-derivative，PID）控制方法能够实时调整主动温控参数. Sun 等[18]提出了一种基于轴向注意力机制和 BiLSTM 的迁移预测方法，相比传统长短期记忆（long short-term memory，LSTM）架构对机床主轴在不同工况下的热误差具有更优的预测稳定性. 赵亮等[19-20]提出了用设计的螺旋盘管冷却器主动控制精密镗床主轴/进给轴热误差的差异化主动冷却策略. Lei 等[21]基于 Vapnik-Chervonenkis 维度方法估计回归模型的泛化误差边界，然后选择模型并估计反馈的可靠性，显著提升了热误差稳定性. 褚亚强等[22]构建了一种基于模糊神经网络-PID 方法的电主轴单元热误差半闭环主动控制方法，比传统的循环冷却控制能更有效抑制热误差. Zheng 等[23]提出了基

于 PID 调节的进给系统的主动温度调节系统，可以有效可靠地调节机床温度场. 对于机床的结构件比如床身、立柱等，刘兴国[24]提出了基于外部温控装置的立柱结构主动控制策略并借助循环冷却液换热技术开发了多回路差异化主动温控装置. 李伟[25]系统分析了典型结构件热变形与热源布局的规律，在此基础上提出了一种热误差主动控制方法.

在整机主动温控系统方面，Choi 等[26]开发了一种基于热驱动支架的误差补偿系统，使外圆磨床加工热误差降低了 57%. 翁凌韬[27]提出了一种基于解析建模的精密机床结构热平衡设计及热主动控制方法，改善了机床精度稳定性. 潘文[28]在多热源作用下利用主动温控装置进行热变形控制，并对比实验与仿真结果，优化了多回路差异化主动温控方法.

针对现有数控机床主动温控方法中温控源安装位置参数及功率特性参数匹配设计难题，本文以卧式铣车复合加工中心为对象，研究温度场分布及热变形规律，揭示主动温控源位置、功率参数对进给轴运动精度的影响规律，以完善现有主动温控源的布局方法及温控策略，提升整机工作精度.

1　机床生散热模型建立

机床结构热变形仿真分析与建模是揭示热误差传递的重要手段. 在仿真分析前，需要首先建立机床的生散热模型并确定热边界条件，主要包括建立机床三维仿真模型、热源生散热模型、导轨热致误差和运动部件六维误差转换模型.

1.1　机床三维模型

在仿真时，机床模型中的一些细节特征和结构部件往往对仿真分析的结果影响较小，甚至无具体影响[28]. 因此在仿真分析前，有必要按以下操作将模型中的此类结构进行简化删除以利于更好地建立生散热模型. 得到简化后的结构模型如图 1 所示，主要内生热源包括电机、电机座、轴承座与导轨.

(1)　对电机、电机座、轴承座结构件，仅保留轴承以及相应的实体结构，去除细微部件结构.

(2)　去除机床整体结构中的螺纹孔以及尺寸较小的倒角、圆角、凸台、凹槽以及退刀槽等细节特征，将 X、Y、Z 三轴进给结构中丝杠简化成圆柱.

1.2　热源生散热模型

电机、轴承、导轨-滑块生热模型的强度计算、散热模型的强度计算模型均参考文献[28]. 在进行有限元仿真分析计算时，将所建立的生热模型的生热量转换为热流密度载荷以及生热率载荷，并以此作为有限元仿真的边界条件开展分析计算. 依据机床现场使用情况，仿真中设置环境温度为 25 ℃. 包含电机、轴承生热模型生热率计算、导轨-滑块生热模型热流密度计算在内的公式为

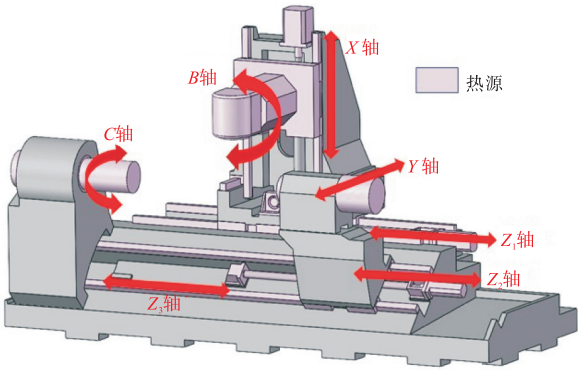


图 1　铣车复合加工中心结构及内生热源分布

Fig.1　Structure and internal heat source distribution of machining-turning composite machining center

$$Q_{\mathrm{m}}=\frac{M_{\mathrm{T}}n_{\mathrm{m}}}{9\,550}(1-\eta) \tag{1}$$

式中：Q_{m} 为电机生热量，J；M_{T} 为伺服电机输出扭矩，N·m；n_{m} 为伺服电机转速，r/min；η 为伺服电机机械效率.

$$Q_{\mathrm{j}}=0.104\,7n_{\mathrm{j}}M_{\mathrm{j}} \tag{2}$$

式中：Q_{j} 为轴承生热量，J；n_{j} 为轴承转速，r/min；M_{j} 为摩擦力矩，N·m，

$$Q_{\mathrm{n}}=\mu_{\mathrm{n}}F_{\mathrm{n}}V_{\mathrm{n}} \tag{3}$$

式中：Q_{n} 为导轨-滑块生热量，J；μ_{n} 为动摩擦因数；F_{n} 为施加到摩擦面上的负荷，N；V_{n} 为导轨滑块的相对运动速度，m/s.

$$H_{\mathrm{a}}=\frac{Nu\cdot\kappa}{L_{\mathrm{a}}} \tag{4}$$

式中：H_{a} 为强制对流散热系数，W/(m^2·K)；Nu 为努谢尔特数；κ 为流体的热传导系数；L_{a} 为定型尺寸，m.

$$q_{\mathrm{m}}=\frac{Q_{\mathrm{m}}}{V_{\mathrm{m}}} \tag{5}$$

式中：q_{m} 为电机生热率，W/m^3；V_{m} 为电机体积，m^3.

$$q_{\mathrm{j}}=\frac{Q_{\mathrm{j}}}{V_{\mathrm{j}}} \tag{6}$$

式中：q_{j} 为轴承生热率，W/m^3；Q_{j} 为轴承生热量，J；V_{j} 为轴承体积，m^3.

$$q_{\mathrm{n}}=\frac{Q_{\mathrm{n}}}{A_{\mathrm{n}}} \tag{7}$$

式中：q_{n} 为导轨-滑块热流密度，W/m^2；A_{n} 为接触面的面积，m^2.

X、Y、Z 三轴进给速度分别设置为 10.0 m/min、20.0 m/min 两档，B 轴进给速度设置为 10.0 m/min，B 轴主轴转速设置为 8 000 r/min，C 轴主轴转速设置为 2 000 r/min. 利用以上公式以及已知参数，选取 Z_1 轴相关结构作为研究对象，计算出在 ANSYS 仿真中各部件施加的热载荷以及边界条件，Z_1 轴热源加载情况如表 1 所示.

表 1　机床热源加载参数

Tab.1　Loading parameters of heat source of machine tool

热源	进给速度 10.0 m/min		进给速度 20.0 m/min		对流系数/ W/(m²·℃)
	生热率/ (kW/m³)	热流密度/ (kW/m²)	生热率/ (kW/m³)	热流密度/ (kW/m²)	
电机	10		14		30.0
电机座	680		850		30.0
轴承座	480		680		30.0
导轨面		100		150	20.0
其余位置	0	0	0	0	9.7

1.3　导轨热致误差和运动部件 6 维误差转换模型

在进行热源加载后，导轨将产生热致误差，这一误差将进一步传递到运动部件上. 以床身-滑台所在的 Z_1 轴为例，建立的导轨热致误差与其造成的滑台 6 维误差之间的误差转换模型显示了误差映射的过程. 图 2 所示为 Z_1 轴床身-滑台结构简图，Z 轴固定坐标系 Z_0-xyz 和滑台连体坐标系 Z_m-xyz 原点分别设置在 Z_1 轴起点 Z_0 和 4 滑块的中心位置 Z_m，两坐标系各坐标轴方向和机床坐标系方向一致. 两条导轨的跨距和同一导轨上两滑块的跨距分别记为 h 和 l，滑块 $i(i=1,2,3,4)$ 在沿导轨运动过程中的 x 向、y 向直线度误差分别记为 $d_{i,x}$、$d_{i,y}$，在 z 向的定位误差记为 $d_{i,z}$. 记滑台 6 维误差为 $\boldsymbol{\xi}=(\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta\alpha \quad \Delta\beta \quad \Delta\gamma)^{\mathrm{T}}$.

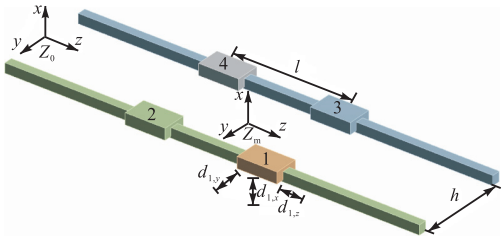


图 2　直线进给轴导轨-滑块模型

Fig.2　Linear feed axis guide-slide model

根据双导轨-4 滑块模型[29]，可得滑台 6 维误差

$$\boldsymbol{\xi}=\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{p} \tag{8}$$

$$\Delta\boldsymbol{p}=(\Delta\boldsymbol{p}_x^{\mathrm{T}} \quad \Delta\boldsymbol{p}_y^{\mathrm{T}} \quad \Delta\boldsymbol{p}_z^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta\boldsymbol{p}_x=(d_{1,x} \quad d_{2,x} \quad d_{3,x} \quad d_{4,x})^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta\boldsymbol{p}_y=(d_{1,y} \quad d_{2,y} \quad d_{3,y} \quad d_{4,y})^{\mathrm{T}}$$

$$\Delta\boldsymbol{p}_z=(d_{1,z} \quad d_{2,z} \quad d_{3,z} \quad d_{4,z})^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{A}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{\lambda}]\cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\lambda}=\left(\frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{2l} \quad \frac{1}{2l} \quad \frac{1}{2h}\right)$$

2　热载荷与热变形规律分析

内生热源主要有 Z_1 轴电机、电机座、轴承座、导轨滑块，如图 3 所示. 床身采用的是多点辅助固定支撑方式，将底部 13 个面进行固定约束. 由于该轴导轨所在结构件的热变形主要通过导轨的变形传递到相邻的下一部件，因此后续分析重点关注 Z_1 轴两条导轨上的参考线 z_line1、z_line2 的变形信息.

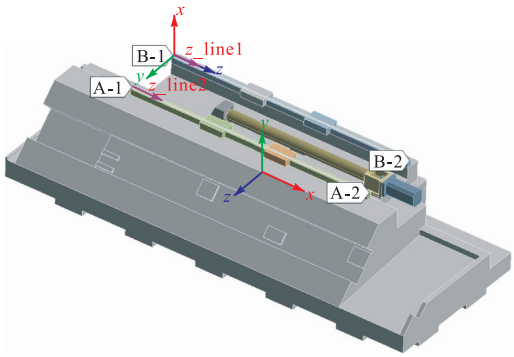


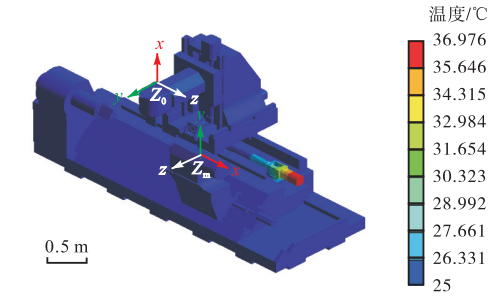
图 3　Z_1 轴所在的床身基础结构件

Fig.3　Base structural component of the Z_1 axis machine tool bed

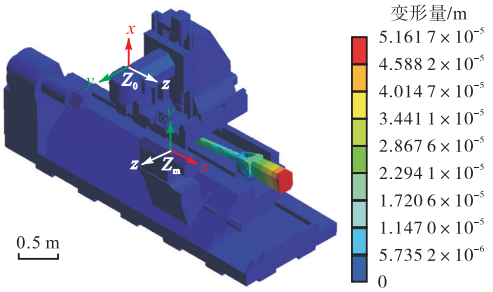
图 4 所示为在环境温度 25 ℃下进行仿真实验并提取在 Z_1 轴电机单独生热情况下加工中心达到稳态时的温度场、变形场. 仿真软件同时会显示参考线 z_line1、z_line2 的位置变化，即为两导轨误差. 根据导轨热致误差和运动部件 6 维误差转换模型计算对应的 Z_1 轴线 6 维误差，并绘制误差曲线如图 5 所示.

根据不同热源边界条件分别施加热载荷开展仿真实验，逐个手动记录不同热源引起的温度场、变形场、导轨变形信息并进行误差转换. 图 6 显示了不同热源生热条件对 6 维运动误差中 ZTX 误差分量所产生的影响.

由图 6 可知，高温电机生热产生的 ZTX 误差是低温电机的 2 倍，电机和电机座单独生热所致 ZTX 误差的叠加等于电机、电机座同时生热产生的 ZTX 误差. 其余误差分量也具有同样的规律. 因此，可以



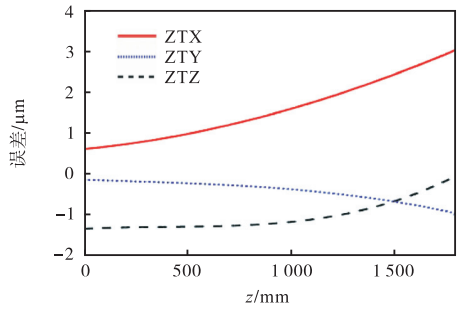
(a) 温度场



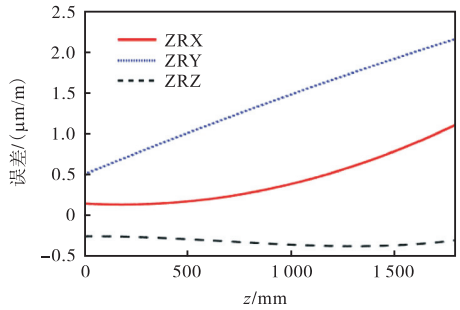
(b) 变形场

图 4 Z_1 轴电机单独作用下的温度场与变形场

Fig.4 Temperature and deformation fields of Z_1 axis motor under individual action



(a) ZTX,ZTY,ZTZ



(b) ZRX,ZRY,ZRZ

图 5 Z_1 轴电机单独作用时的运动部件 6 维运动误差

Fig.5 Six-dimensional motion error of moving parts when Z_1 axis motor acts alone

总结出如下规律:

(1) Z_1 轴 6 维运动误差分量中,ZTX、ZRY 误差数值显著大于其他误差分量,可以认为 ZTX、ZRY 是需要通过热误差主动调控来严格控制的关键误差参数.

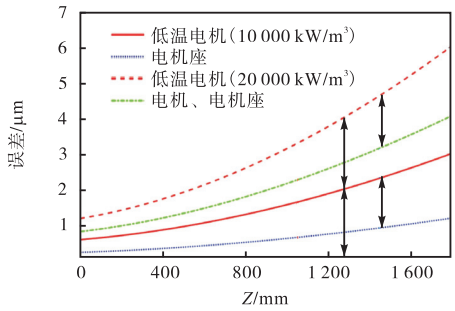


图 6 不同热源作用下的导轨 ZTX 误差

Fig.6 ZTX error of guide rail under different heat sources

(2) 对于符合胡克定律的线弹性材料,多个热源综合影响下的热变形等于多个单一热源影响下的热变形之和[30]. 此结论同样可以推广到进给轴线的 6 维运动误差,即轴线 6 维运动误差 l_j 与热载荷 p 之间存在线性正相关的关系. 每个热源单独产生的 6 维误差的叠加与这些热源共同产生的 6 维误差的效果一致,原本影响大的热源在叠加热源里的影响占比高,即

$$l_j = L(p) \tag{9}$$

式中 $L(p)$ 是一个线性算子,满足可加性和齐次性. 在这里 $L(p)$ 可表示为

$$L(p) = kp + b \tag{10}$$

式中 k、b 为参数,由热源自身性质决定.

(3) 主动温控源作为人为添加的热源,与机床内生热源具有相同的热性质. 两者在仿真和工程实际中的物理意义是相同的,相应的仿真实验结果也验证了这一结论,热规律适用于机床的各类内外部热源,具有普适性.

3 温控源位置与导轨热变形的关系

在主动温控源的诸多参数中,安装位置和生散热功率是易于调节且需要再设计阶段重点考虑的. 功率与变形的关系在前文已经给出,在无内生热源状态下单独研究主动温控源位置对结构件热变形规律的影响有助于合理布置主动温控源,以实现更好的热主动控制.

选取机床合适位置添加主动温控源可以实现更有效的热主动控制. 目前实验室所用到的主动温控源尺寸为 250 mm × 150 mm × 20 mm,与机床结构直接接触传热,采用 PID 闭环控制,温度测试通道 48 个,温度测试精度为−0.05 ~ 0.05 ℃,主动温控回路数量 8 个,主动温控范围为 15 ~ 25 ℃,主动控温精度

范围为−0.1 ~ 0.1 ℃. 如图 7 所示，观察机床结构并结合经验可知，将主动温控源布置到 Z_1 轴两导轨之间的槽中平面可以满足主动温控源尺寸需求不发生干涉并且可以对两条导轨都有较为明显的控制效果，在两条轴线上同步布置两块放热功率 20 W 的主动温控源作为一组，每隔 50 mm 改变温控源位置观测加工中心 Z_1 轴导轨关键路径上的 3 维位置误差.

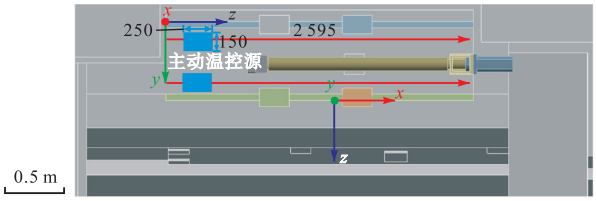


图 7　主动温控源安装路径

Fig.7　Installation path of active temperature control source

仿真实验得到了不同位置的主动温控源产生的导轨三维位置误差散点，将导轨三维位置误差散点用 4 次多项式曲线拟合. 如图 8 所示，用神经网络方法以温控源位置值 x 作为输入，以 4 次多项式函数的 5 个参量 $a_i(i=0,1,2,3,4)$ 作为输出. 由于在导轨路径上每隔 50 mm 采集一组数据，故总数据量为 48 组，其中训练数据、验证数据、测试数据的数量之比为 6∶2∶2. 采用 5 层莱文贝格-马夸特训练算法进行神经网络拟合，构建导轨热变形预测函数. 将路径上的任意位置值输入这一预测函数，可以获得两导轨的三向位置误差以及轴线 6 维运动误差的预测值.

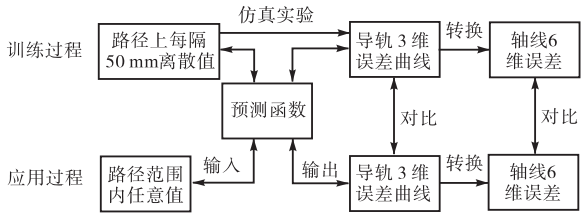


图 8　温控源位置与导轨热变形映射规律构建方法

Fig.8　Construction method of mapping law between temperature control source position and guide rail thermal deformation

以 z_line1 导轨 x 方向直线度误差为例，模型拟合性能如图 9 所示. 256 轮迭代后出现最优值，拟合性能良好. 进行训练后可以得到的拟合函数在输入任意位置值 x 后可以得到对应的两导轨 3 维位置误差预测曲线，进而推导得到轴线 6 维误差预测曲线. 最终建立主动温控源位置 x 与轴线 6 维误差 l_j 的关系.

$$l_j \leftrightarrow g(x) \tag{11}$$

式中 $g(x)$ 为训练得到的拟合函数.

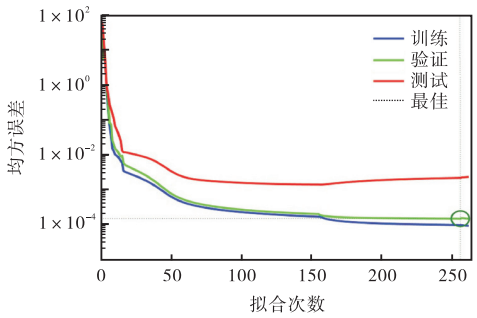


图 9　导轨 x 向直线度误差拟合性能

Fig.9　Fitting performance of x-directional straightness error of guide rail

利用得到的拟合函数，将输入值设置为 1 000 mm，即热流 20 W 热源布置在 1 m 处时，Z_1 轴两导轨三维位置误差预测效果如图 10 所示，Z_1 轴 6 维误差预测效果如图 11 所示，黑色实线显示了真实

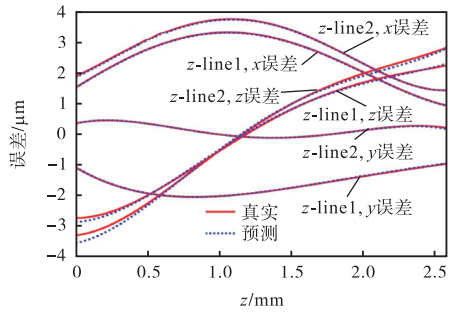
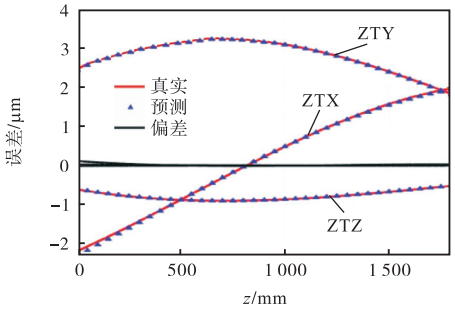
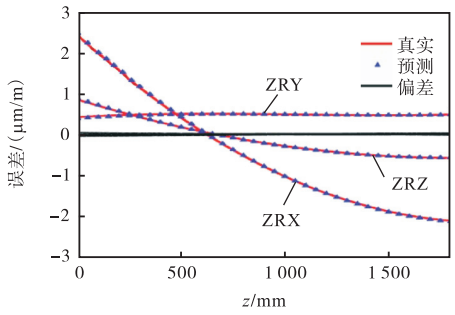


图 10　两导轨的 3 维位置误差预测效果

Fig.10　Prediction effect of three-dimensional position error of two guide rails



（a）ZTX，ZTY，ZTZ



（b）ZRX，ZRY，ZRZ

图 11　轴线 6 维误差预测效果

Fig.11　Prediction effect of six-dimensional axis error

值与预测值的偏差. 可以看出,神经网络对于 6 维误差的预测效果好,该函数模型可以用于估计温控源位置变化引起的热误差.

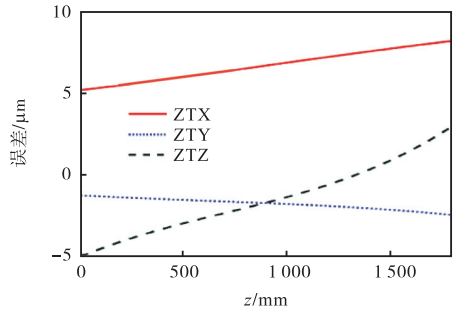
4 主动温控源位置与功率参数的确定

由于主动温控源功率、位置与轴线 6 维运动误差曲线 l_j 的关系已经明晰,表示为式(9)、式(11),因此可以通过调节主动温控源位置 x、功率 p 对导轨在内生热源作用下的热变形进行主动控制,以抵消其对工件加工精度产生的不良影响.

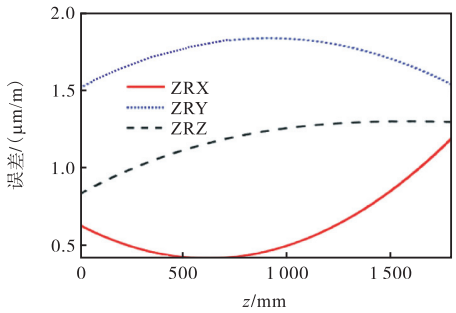
$$l_j \leftrightarrow f(p,x) \tag{12}$$

式中 $f(p,x)$ 为轴线 6 维运动误差关于主动温控源功率、位置的二元函数.

施加 Z_1 轴全部热源,通过仿真提取加工中心在 Z_1 轴为 10.0 m/min 进给速度工况下达到稳态时的 6 维误差曲线 l_{oj},如图 12 所示. 此时的热误差为初始热误差,需要合理确定主动温控源的设计参数以尽量减小此热误差,即确定主动温控源的位置和功率.



(a) ZTX,ZTY,ZTZ



(b) ZRX,ZRY,ZRZ

图 12 未温控时的运动误差曲线

Fig.12 Motion error curve without temperature control

进行热误差控制之前,首先要选定热误差的评价指标,由于导轨的 z 向误差对于该轴运动部件的运动精度无影响,故选取 ZTX、ZTY、ZRX、ZRY、ZRZ 5 条曲线与横轴所围面积之和 S 为指标,评价轴线运动误差的大小.

$$S = \sum_{1}^{5} \int_{0}^{1800} \left| l_j - l_{0j} \right| \mathrm{d}x \tag{13}$$

式中:S 为误差评价指标;l_{0j} 为一定工况下的初始 6 维误差;l_j 为温控后的各项误差曲线. 这里评价轴线热误差的指标并不唯一,亦可根据研究对象的具体情况选取.

当 Z_1 轴为 10.0 m/min 进给速度工况时,这一指标下的导轨初始热误差 S 为 34 045.8. 遍历位置与功率的可行域,可以求得不同温控源位置和功率条件下的 S 值,如图 13 所示.

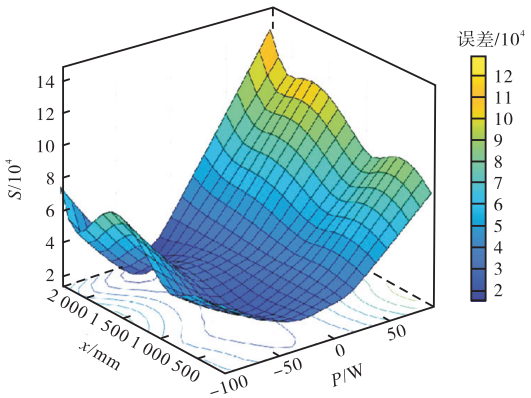


图 13 误差曲面

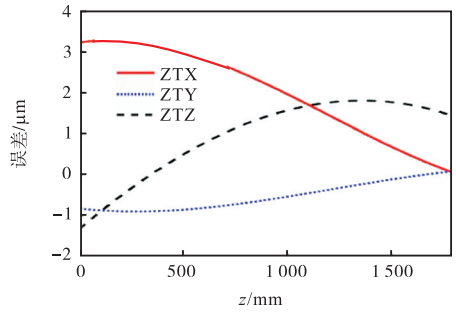
Fig.13 Error surface

可以看出:温控源位置不变的前提下,在功率轴方向上,功率为 0 时误差为初始误差值,随着温控源功率从正值到负值,6 维误差逐渐减小至最小然后再增大,最小值位于−50 ~ −30 W 区间. 在功率不变的情况下,温控源位置值越大,总体而言热误差值越大,最小值出现在 2 150 mm 左右,大概为电机热源附近,可见在主要热源附近添加生散热模块,对于误差控制的敏感性较强. 该工况下在 2 145 mm 处布置热功率−38 W 的主动温控源是产生误差最小的最优主动温控源. 仿真得到的导轨 6 维误差如图 14 所示.

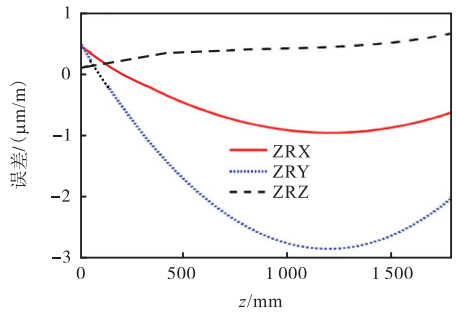
将两幅图线的误差进行对比,从直观上看,最显著的 ZTX 误差的最大值和最小值分别从 8 μm 和 5 μm 减小为 3 μm 和 0 μm,可以发现进行温控后按上述描述 6 维误差评价指标 S 的数值从 34 045.8 降低为 13 924.4,降低幅度近 60%,传递至刀尖后就会表现为工件加工误差明显减小,证明了所提温控源参数选取方法的有效性.

当进给速度不同时,表 2 显示了不同工况下用此种方法确定的最优位置和功率略有差别,在 0 ~ 20.0 m/min 进给速度工况下,最优温控源应该是功率在−60 ~ −20 W 之间且大致处于 2 150 mm 处. 在实际生产中,散热源应当布置在主要热源周围,随着进给

速度的加快，机床内生热源生热量增大，应该使主动温控源吸热功率变大以适应这种变化. 这种方法可以确定最佳主动温控源位置和功率的大致范围和趋势，根据实际工况变化做出有目的性的调整.



（a）ZTX，ZTY，ZTZ



（b）ZRX，ZRY，ZRZ

图 14　温控后的运动误差曲线

Fig.14　Motion error curves after temperature control

表 2　不同工况下主动温控源最佳功率和位置

Tab.2　Optimal power and position of active temperature control source under different operating conditions

进给速度/(m/min)	功率/W	位置/mm
2.5	−26	2 155
5.0	−30	2 150
7.5	−34	2 150
10.0	−38	2 145
12.5	−42	2 145
15.0	−46	2 145
17.5	−50	2 145
20.0	−54	2 145

5　结　论

本文以 KTX1250TC 型号铣车复合加工中心为对象，首先研究揭示了不同热源热功率与轴线 6 维运动误差间的映射规律，而后运用神经网络拟合方法实现了温控源位置对导轨热变形误差曲线的预测，最后在此基础上提出了主动温控源位置和功率参数的选取策略，具体结论如下.

（1）建立了热源热功率和导轨热变形、轴线热致运动误差之间的关系. 验证了进给轴 6 维运动误差与热载荷数值之间存在线性正相关的关系，为分析多热源作用下的轴线热致运动误差提供了依据.

（2）构建了基于主动温控源安装位置预测导轨热变形规律的模型. 机床主动温控源位置与热变形的关系难于通过简单的理论计算得到，本文采用神经网络方法构建二者之间的黑盒模型，实现了导轨热变形的高效、准确预测.

（3）提出了面向进给轴热致运动精度最优的主动温控源安装位置、生散热功率匹配选取策略. 首先提出轴线热致运动误差的评价标准，在测定出机床在普遍工况下的初始误差，以及揭示温控源位置、功率和热致运动误差之间数学关系的基础上，确定使热致运动误差最小的主动温控源位置和功率，为主动温控系统与机床间的匹配设计提供依据.

（4）本文研究结论已用于指导该机床主动温控系统的设计与研制工作，后续将进一步开展主动温控与热误差补偿等实验研究.

参考文献：

[1] 杨建国，姚晓栋. 数控机床误差补偿技术现状与展望[J]. 世界制造技术与装备市场，2012(3)：64-71，95.
Yang Jianguo，Yao Xiaodong. Present situation and prospect of error compensation technology for CNC machine tools[J]. World Manufacturing Engineering & Market，2012(3)：64-71，95(in Chinese).

[2] Bryan J. International status of thermal error research (1990)[J]. CIRP Annals：Manufacturing Technology，1990，39(2)：645-656.

[3] Mayr J，Jedrzejewski J，Uhlmann E，et al. Thermal issues in machine tools[J]. CIRP Annals，2012，61(2)：771-791.

[4] 项四通，杜正春，杨建国. 数控机床几何与热误差测量和建模研究新进展[J]. 机械设计与研究，2019，35(6)：52-57.
Xiang Sitong，Du Zhengchun，Yang Jianguo. Recent advances in measurement and modeling of geometric and thermal error of CNC machine tools[J]. Mechine Design & Research，2019，35(6)：52-57(in Chinese).

[5] 赵万芹，刘昊栋，施　虎. 机床热特性研究[J]. 科学技术与工程，2021，21(7)：2563-2574.
Zhao Wanqin，Liu Haodong，Shi Hu. Research on thermal characteristics of machine tools[J]. Science

Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2563-2574(in Chinese).

[6] Liang Y C, Su H, Lu L H, et al. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(1): 635-645.

[7] 杜正春, 范开国, 杨建国. 数控机床误差实时补偿技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
Du Zhengchun, Fan Kaiguo, Yang Jianguo. Real-Time Error Compensation Technology for CNC Machine Tool and Its Application[M]. Beijing: China Machinery Industry Press, 2020(in Chinese).

[8] 刘 阔, 韩 伟, 王永青, 等. 数控机床进给轴热误差补偿技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 156-173.
Liu Kuo, Han Wei, Wang Yongqing, et al. Review on thermal error compensation for feed axes of CNC machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 156-173(in Chinese).

[9] Liu K, Song L, Liu H Q, et al. Online evolutionary method for mechanism-driven time-varying thermal error model of machine tools[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(12): 13656-13664.

[10] Jia G J, Zhang X, Wang X Z, et al. A spindle thermal error modeling based on 1DCNN-GRU-Attention architecture under controlled ambient temperature and active cooling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(3): 1525-1539.

[11] Liu K, Song L, Han W, et al. Time-varying error prediction and compensation for movement axis of CNC machine tool based on digital twin[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 109-118.

[12] Ma C, Gui H Q, Liu J L. Self learning-empowered thermal error control method of precision machine tools based on digital twin[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2023, 34(2): 695-717.

[13] Ma C, Zhao L, Mei X S, et al. Thermal error compensation of high-speed spindle system based on a modified BP neural network[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9/10/11/12): 3071-3085.

[14] Weng L T, Gao W G, Zhang D W, et al. Analytical modelling of transient thermal characteristics of precision machine tools and real-time active thermal control method[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 186: 104003.

[15] Mitsuishi M, Warisawa S, Hanayama R. Development of an intelligent high-speed machining center[J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 275-280.

[16] Li G L, Wang Z Y, Li Z Y, et al. Segmented modeling and compensation of thermal error of gear grinding machine spindle based on variable thermal hysteresis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 126(11): 5107-5121.

[17] Zhang Y F, Wang P, Liu T, et al. Active and intelligent control onto thermal behaviors of a motorized spindle unit[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9): 3133-3146.

[18] Sun J C, Liu Z Y, Qiu C, et al. An axial attention-BiLSTM-based method for predicting the migration of CNC machine tool spindle thermal error under varying working conditions[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 130(3): 1405-1419.

[19] 赵 亮, 雷默涵, 朱星星, 等. 高精度数控机床主轴系统热误差的控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(11): 1165-1171.
Zhao Liang, Lei Mohan, Zhu Xingxing, et al. A new thermal error control method for spindle system of high precision computer numerical control machine tools[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(11): 1165-1171(in Chinese).

[20] 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.
Zhao Liang, Wang Mengchao, Lei Mohan, et al. A differentiated active cooling strategy for feed axis of precision boring machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 91-100(in Chinese).

[21] Lei M H, Gao F, Li Y, et al. Feedback control-based

active cooling with pre-estimated reliability for stabilizing the thermal error of a precision mechanical spindle[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2022，121(3)：2023-2040.

[22] 褚亚强，刘　腾，张艺凡，等. 电主轴单元热误差半闭环主动控制方法[J]. 机械设计与研究，2021，37(5)：111-116.
Chu Yaqiang，Liu Teng，Zhang Yifan，et al. Semi closed loop active control method for thermal error of motorized spindle unit[J]. Mechine Design & Research，2021，37(5)：111-116(in Chinese).

[23] Zheng Y J，Gao W G，Zhang D W，et al. Active temperature control method based on time grating principle for the feed system of precision machine tool and its application[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2023，124(5)：1537-1555.

[24] 刘兴国. 机床结构热主动控制装置与方法研究及应用[D]. 天津：天津大学，2017.
Liu Xingguo. Research and Application of Thermal Active Control Device and Method for Machine Tool Structure[D]. Tianjin：Tianjin University，2017(in Chinese).

[25] 李　伟. 精密卧式加工中心结构热源布局与热主动控制方法[D]. 天津：天津大学，2021.
Li Wei. Heat Source Layout and Thermal Active Control Method of Precision Horizontal Machining Center Structure[D]. Tianjin：Tianjin University，2021(in Chinese).

[26] Choi H S，Lee S K. Machining error compensation of external cylindrical grinding using thermally actuated rest[J]. Mechatronics，2002，12(5)：643-656.

[27] 翁凌韬. 基于解析建模的精密机床结构热平衡设计及热主动控制方法[D]. 天津：天津大学，2021.
Weng Lingtao. Thermal Balancing Design and Thermal Active Control Methods for Precision Machine Tool Structural Components Based on Analytical Modeling Method[D]. Tianjin：Tianjin University，2021(in Chinese).

[28] 潘　文. 多热源作用下机床结构热特性仿真分析与主动控制方法[D]. 天津：天津大学，2019.
Pan Wen. Simulation Analysis and Active Control Method of Thermal Characteristics of Machine Tool Structure Under the Multi-Heat Source[D]. Tianjin：Tianjin University，2019(in Chinese).

[29] 田文杰. 精密卧式加工中心几何精度设计及误差补偿方法研究[D]. 天津：天津大学，2015.
Tian Wenjie. Investigation into Accuracy Design and Error Compensation of High-Precision Horizontal Machining Centers[D]. Tianjin：Tianjin University，2015(in Chinese).

[30] 董　源，过增元. 从热质理论到能质理论[J]. 工程热物理学报，2012，33(3)：465-468.
Dong Yuan，Guo Zengyuan. From thermomass theory to kinetomass theory[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2012，33(3)：465-468(in Chinese).

（责任编辑：王晓燕）