

DOI: 10.7652/xjtuxb201507018

车床主轴与进给轴耦合热误差建模及补偿研究

孙志超, 陶涛, 黄晓勇, 梅雪松, 王新孟, 杨军, 赵亮
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对车床实际加工中主轴与进给轴的热误差相互耦合共同影响工件精度的问题,建立了综合热误差模型并进行了有效补偿。以海德曼 HTC500/500 精密车床为研究对象,对车床主轴与进给轴热误差的耦合关系进行了解耦;利用模糊聚类理论实现了车床测温点的优化分组,建立了主轴与进给轴的耦合热误差多元线性回归模型,并在精密车床上得到实际应用。结果表明:车床耦合热误差模型符合实际工况,模糊聚类有效降低了温度变量之间的多重共线性,提高了模型的预测精度;主轴 x/z 方向的预测精度达 88.4%、90.7%,进给轴 x/z 方向的预测精度达 82.9%、71.3%;补偿后车床 x/z 方向精度分别提高了 60.3%、56.6%,证明了耦合热误差模型的准确性。

关键词: 热误差解耦;热误差建模;模糊聚类分析;误差补偿

中图分类号: TH161;TG532 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)07-0105-08

Modeling and Compensation of Coupled Thermal Error of Spindle and Feed Shafts

SUN Zhichao, TAO Tao, HUANG Xiaoyong, MEI Xuesong, WANG Xinmeng,
YANG Jun, ZHAO Liang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The mutually coupled thermal error of spindle and feed shafts for a lathe strongly affects precision of workpieces. A coupled thermal error model is proposed and implemented for machine tools. For a Headman HTC550/500 precision lathe, the coupled thermal error of spindle and feed shafts is decoupled, and fuzzy clustering is used to optimize the temperature measuring points. Subsequently, a multi-variable linear regression model for coupled thermal error is established and applied. The results show that the coupled thermal error model coincides with the lathe's actual situation; the fuzzy clustering effectively lowers the multicollinearity among temperature variables to improve the prediction accuracy; the prediction accuracy in x and z directions reaches 88.4% and 90.7% for spindle, and 82.9% and 71.3% for feed shafts, so the accuracy of the lathe is improved by 60.3% in x direction and by 56.6% in z direction after compensation.

Keywords: thermal error decoupling; thermal error modeling; fuzzy clustering; thermal error compensation

车床热误差严重制约着精密和超精密加工行业的发展,热误差占据了车床总误差的 70%^[1],对车床的加工精度影响最大。目前,消除热误差主要有两种方法:热误差预防法和热误差补偿法^[2]。近年

收稿日期: 2014-11-15。 作者简介: 孙志超(1989—),男,硕士生;杨军(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA040701)。

网络出版时间: 2015-04-22 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150422.1444.004.html>

来,关于车床热误差的研究和理论越来越多,产生了很多有价值的科研成果。Donmez 认为变化的温度使车床产生热变形,是车床的主要误差源,车床越精密受其影响越大^[3];Mou 认为车床的热特性是由于热源位置、车床材料及强度、车床结构等多种因素共同作用和相互耦合的结果^[4];Min 等人提出了基于傅里叶热力学方程为基础的热态模型,分析不同边界条件下丝杠温度场的分布特性^[5],对研究车床进给轴热误差特性打下一定的基础。相关理论的增多也伴随着车床热误差建模方法的增多,Yang 等人利用神经网络技术建立了主轴热误差与温度之间的关系模型^[6];杨军等人利用模糊聚类优化温度测点,并结合最小二乘支持向量机和神经网络技术,构建了精密坐标镗床主轴的热误差模型^[7-8],取得了良好的预测效果;Wu 等人利用有限元仿真技术,建立了丝杠预紧力和进给速度与丝杠温度场和热变形的关系模型,并通过试验验证了模型的有效性^[9];Lin 等人利用最小二乘支持向量机理论建立了主轴热误差与温度变化的相关关系^[10];郭前建等人结合聚类分析理论建立了滚齿机热误差的多元线性回归模型,提高了热误差模型的预测精度^[11]。Chao 等人利用神经网络模型和基于反馈线性自回归滑动平均的小波元神经网络模型建立了数控车床进给系统在不同工况下温度场分布和热变形的数学模型^[12];谢春等人利用神经网络算法建立了五轴车铣复合加工中心进给轴的综合热误差模型^[13],并做了相关实验验证;Abdulshahed 等人提出了一种改进的自适应模糊推理系统,建立了车床主轴的热误差预测模型,提高了预测精度^[14];苗恩铭等人建立了数控加工中心主轴的支持向量回归机模型,并在不同的环境温度下验证了模型的准确性,取得了良好的预测效果^[15]。

当前文献主要针对车床的主轴和进给轴单个系统分别进行建模及补偿,而实际加工中主轴与进给轴的热误差并行存在,共同影响工件的加工精度。单个系统独立补偿与实际不符,而将两者的热误差结合在一起的研究非常少。本文针对车床主轴与进给轴热误差的耦合问题进行了解耦分析,建立了耦合热误差模型;以海德曼 HTC550/500 车床为研究对象进行了补偿应用,验证了耦合热误差模型的有效性及其鲁棒性。

1 西门子系统热误差补偿方法

1.1 西门子热误差补偿方式

为了适应市场需求,西门子为用户提供了热误

差补偿的接口,供用户自定义热误差补偿的形式及模型参数。西门子认为金属受热膨胀与温度之间是线性关系,主轴的热误差模型只与温度有关,与坐标位置无关;进给轴的热误差模型与温度和坐标位置都相关。西门子开放的热误差补偿原理如图 1 所示。

车床坐标 P_x 处的热误差补偿值

$$\Delta K_x = K_0(T) + (P_x - P_0)\tan\beta(T) \quad (1)$$

式中: $K_0(T)$ 表示在温度 T 下与位置无关的热误差补偿值; $\tan\beta(T)$ 表示在温度 T 下与位置相关的热误差补偿系数; P_x 表示补偿轴的实际坐标值; P_0 表示补偿轴的参考位置坐标。实际上在不同的温度条件下相同坐标位置 P_x 处的补偿值是不一样的,主要是由 $K_0(T)$ 和 $\tan\beta(T)$ 共同作用的影响。在图 1 中可以看出,距离参考点 P_0 越远,对应的热误差越大。对于进给轴而言,确定参考位置 P_0 和补偿系数 $\tan\beta(T)$ 尤为重要。

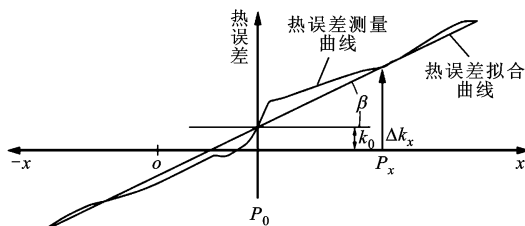


图1 温度 T 下热误差的近似拟合线

1.2 主轴与进给轴热误差解耦

车床的热误差最终反映在刀具与工件相对位置的偏离,从而导致车床的加工精度降低,废品率升高造成生产成本的提高。热误差补偿的目的在于消除或者减小由金属热膨胀而导致的车床刀具与工件之间的位置偏离,从而提高车床的加工精度。刀具与工件之间位置的偏离本质上是由主轴与进给轴热误差相互耦合共同作用的结果,因此寻找主轴与进给轴之间的耦合关系对于热误差模型的建立至关重要。为了能够得到准确的热误差数学模型,就需要对两者之间进行解耦,分别得到各自的数学模型,再将模型根据耦合关系耦合在一起,便得到了车床总体的热误差数学模型。

进给轴在进给状态下丝杠螺母副由于摩擦产生热量,所以丝杠温度升高,并伴随着热伸长。此车床是半闭环系统,丝杠的伸长导致进给轴热误差的产生。主轴在高速状态下旋转时,前端轴承与后端轴承摩擦产生一定的热量,热量传递到主轴,主轴受热就会产生热变形,导致热误差产生。主轴热伸长 Δl 的方向与 z 轴相同,而主轴热升高 Δh 则会在 x 轴方向产生分量 Δx 。只有分别分析主轴和进给轴的

热误差,分别建立相应的数学模型,才能准确全面地反映车床在 x 、 z 方向产生的热误差。主轴与进给轴的热误差耦合示意图如图 2 所示。

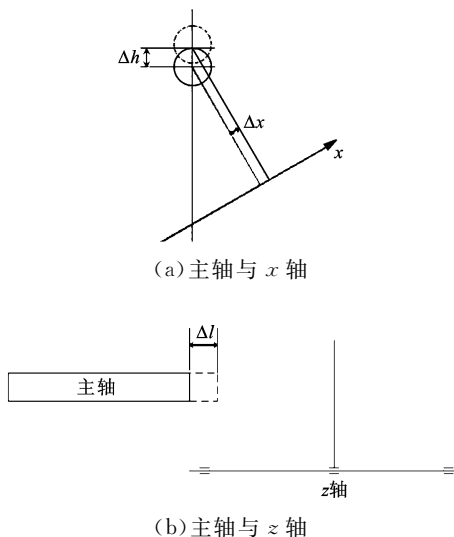


图 2 主轴与 x/z 轴热误差耦合示意图

车床主轴只有旋转一个运动状态,不存在坐标位置的变换,故主轴的热误差只与自身温度变化相关,热误差模型与位置无关。环境温度的改变,以及主轴旋转造成自身温度的提高,不仅会影响主轴的热伸长,同样会造成主轴在垂直方向的变化。主轴在垂直方向的位置变化主要是由于主轴箱体受热膨胀导致主轴整体升高的缘故,受环境温度影响较大主轴在 x 方向的热误差多元线性回归模型为

$$\Delta x = \Delta h \sin \alpha = \Delta K_{\text{spi1}} = K_{\text{spi1}}(T) = \beta_{0\text{spi1}} + \beta_{1\text{spi1}}(T_1 - T_{00}) + \beta_{2\text{spi1}} \Delta T_2 \quad (2)$$

式中: Δx 、 ΔK_{spi1} 为主轴在 x 向的热误差; $\beta_{0\text{spi1}}$ 、 $\beta_{1\text{spi1}}$ 、 $\beta_{2\text{spi1}}$ 为模型系数; T_1 为环境温度; ΔT_2 为主轴温度变化量; T_{00} 为车床装配车间温度。因为用户使用车床的环境温度往往不同于车床生产商装配车间的温度,环境温度的改变必然导致进给轴丝杠的热伸长,故将环境温度的变化量作为模型的重要参量处理。

x 轴的热误差主要是由 x 轴丝杠的热伸长引起的,丝杠的固定方式为一端固定、一端游动,靠近电机端为固定端,远离电机端为游动端,当 x 轴丝杠受热时会向游动端伸长,固定端位置不会发生变化,可以作为热误差为 0 的参考点。 x 轴热误差与位置和温度相关,选定参考点, x 轴的热误差多元线性回归模型为

$$\Delta K_{x1} = (P_x - P_{0x}) \tan \beta(T)_x = [\beta_{0x} + \beta_{1x}(T_1 - T_{00}) + \beta_{2x} \Delta T_3](P_x - P_{0x}) \quad (3)$$

式中: ΔK_{x1} 为 x 轴的热误差补偿; $\tan \beta(T)_x$ 为丝杠

的热膨胀系数; β_{0x} 、 β_{1x} 、 β_{2x} 为模型系数; ΔT_3 为 x 轴丝杠螺母座的温度变化量; P_x 为 x 轴的实际坐标值; P_{0x} 为 x 轴热误差为 0 的参考位置点。

以上将车床 x 方向的热误差分别解耦到主轴和 x 轴各自的热误差,并分别建立了各自的热误差模型。解耦是将复杂问题简单化,解耦之后还需要将解耦后的结果重新进行耦合。 x 轴为倾斜式安装,如图 2 所示,车床 x 方向热误差的耦合模型为

$$\Delta K_x = \Delta x + \Delta K_{x1} \quad (4)$$

式中: ΔK_x 为车床 x 方向总热误差。

同理,主轴的热伸长与 z 轴方向相同,热误差多元线性回归模型可以表示为

$$\Delta z = \Delta K_{\text{spi2}} = K_{\text{spi2}}(T) = \beta_{0\text{spi2}} + \beta_{1\text{spi2}}(T_1 - T_{00}) + \beta_{2\text{spi2}} \Delta T_2 \quad (5)$$

$$\Delta K_{z1} = \tan \beta(T)_z (P_z - P_{0z}) =$$

$$[\beta_{0z} + \beta_{1z}(T_1 - T_{00}) + \beta_{2z} \Delta T_4](P_z - P_{0z}) \quad (6)$$

$$\Delta K_z = \Delta z + \Delta K_{z1} \quad (7)$$

式中: ΔK_z 为车床 z 方向总热误差; Δz 、 ΔK_{spi2} 为主轴在 z 向的热误差; ΔK_{z1} 为 z 轴的热误差; $\beta_{0\text{spi2}}$ 、 $\beta_{1\text{spi2}}$ 、 $\beta_{2\text{spi2}}$ 为模型系数; β_{0z} 、 β_{1z} 、 β_{2z} 为模型系数; ΔT_4 为 z 轴丝杠螺母座的温度变化量; P_z 为 z 轴的实际坐标值; P_{0z} 为 z 轴热误差为 0 的参考位置点。

2 热特性实验及结果分析

2.1 实验设计及测量原理

以浙江海德曼车床有限责任公司生产的 HTC 550/500 车床为研究对象,分析车床 x 、 z 方向热误差与温度变量的关系。车床 x 和 z 方向的最大有效行程分别为 180 mm 和 520 mm,最高进给速度分别为 30 m/min 和 36 m/min。

测试设备如下:RENISHAW 激光干涉仪用于测量进给轴热误差值;温度位移同步采集系统获得温度值及主轴热误差值;选用高精度温度传感器 PT100、高精度电涡流位移传感器。温度传感器 PT100 记为 $T_0, \dots, T_{17}$, $T_1 \sim T_8$ 安装在主轴箱前端、后端和中部, T_9 安装在 z 轴电机上, T_{10} 安装在 z 轴前轴承上, T_{11} 安装在 z 轴后轴承上, T_{12} 安装在 z 轴螺母座上, T_{13} 安装在 x 轴电机上, T_{14} 安装在 x 轴前轴承上, T_{15} 安装在 x 轴后轴承上, T_{16} 安装在 x 轴螺母座上, T_{17} 采集环境温度;位移传感器记为 $S_1, \dots, S_5$ 。主轴热误差测量原理如图 3 所示。

以车床主轴、 x/z 轴的热误差为研究对象,主轴的热误差测量采用五点法测量。主轴的热伸长由

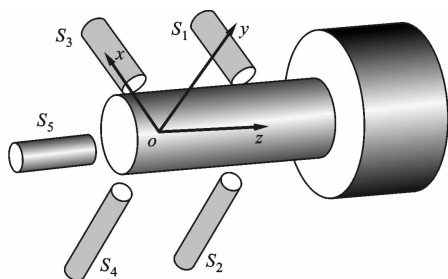


图3 主轴热误差测量原理示意图

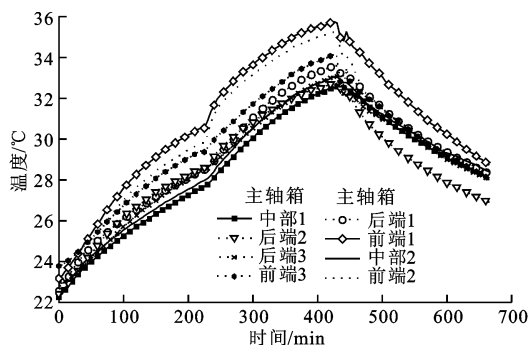
S_5 测量获得, x 方向的热误差由 S_1 和 S_3 测量获得, y 方向的热误差由 S_2 和 S_4 测量获得。由于转速不同, 主轴的热变形略有不同, 所以实验中设计了 1 000、1 500、2 000 r/min 3 种不同的转速。 z 轴热误差由激光干涉仪测量, 测量范围为 $[-495 \text{ mm}, 0 \text{ mm}]$, 各测量点间距为 45 mm, 共 12 个测点。 z 轴坐标 0 处作为激光干涉仪测量原点。 x 轴的热误差测量范围为 $[-165 \text{ mm}, 0 \text{ mm}]$, 各测点间距为 15 mm, 共 12 个测点, 0 处作为激光干涉仪测量原点。实验初始时, 在冷态下测量进给轴各测点误差, 作为进给系统的几何误差, 进给系统连续往复运动 30 min 后测量各测点的误差, 此误差减去几何误差作为此刻进给系统的热误差^[16]。依据 VDI/ISO 标准, 每次重复测量 3 个循环, 每个测点测量 2 s, 进给系统暂停 4 s, 为防止反向间隙对端点处热误差产生影响, 取反向越程 5 mm。由于进给速度不同, 进给系统的热变形略有不同, 实验设计了 500、1 000、1 500 mm/min 3 种不同的工况。

2.2 结果分析

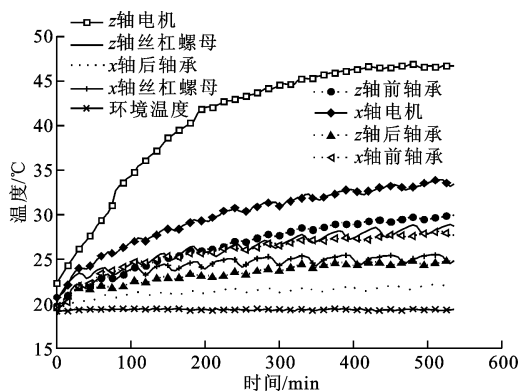
2.2.1 温度场时域分析 当主轴旋转进给轴不动时, 主轴箱的温度变化如图 4a 所示。主轴箱前端最高温度达 36°C , 最大温差大约 13°C ; 主轴箱后端最高温度达 34°C , 最大温差为 12°C ; 主轴箱中部最高温度达 33°C , 最大温差为 11°C 。由主轴的结构可知, 主轴前端有一个圆柱滚子轴承和两个角接触球轴承, 后端一个圆柱滚子轴承, 主轴箱内部有空隙。主轴箱前端生热较多, 后端生热较少, 如图 4a 所示, 前端温度高于后端, 中部温度最低。

当 z 轴进给主轴不动时, z 轴丝杠螺母座与电机端轴承的温度变化如图 4b 所示。由于丝杠为转动体, 无法用 PT100 直接测量丝杠的温度, 因此改为测量丝杠螺母座和电机端轴承座的温度来间接反映丝杠的温度变化, 这是由于丝杠温度的变化是由轴承及丝杠与螺母之间相对转动产生摩擦而发热引起的。因此, 由螺母座和电机端轴承的温度来间接

反映丝杠的温度变化是合理的。同理, 当 x 轴进给时车床其他部分静止, x 轴丝杠螺母座与电机端轴承的温度变化如图 4b 所示。



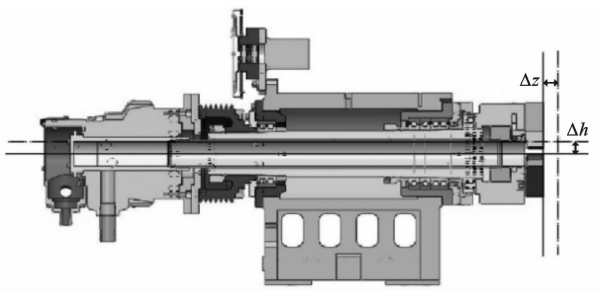
(a) 主轴箱

(b) x/z 轴图4 主轴与 x/z 轴温度场变化

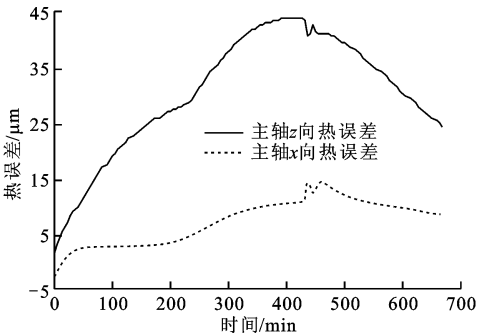
2.2.2 主轴热变形分析 主轴的内部结构如图 5a 所示, 由图可看出, 皮带轮带动整个主轴系统运转, 主轴为中空轴, 由循环空气进行冷却, 主轴前端有 3 个轴承而后端有一个轴承, 主轴的中部与主轴箱之间有空气间隔。主轴旋转时轴承的内、外圈与滚子之间相对运动产生摩擦而发热, 热量通过热传导分别传递到主轴、主轴箱体下部及主轴箱的其他部分。主轴温度的升高是导致主轴热伸长的主要原因, 而主轴的热伸长导致车床 z 方向产生热误差 Δz ; 主轴箱体下部的温升是导致主轴整体升高 Δh 的主要原因, 而主轴的整体温度升高导致车床 x 方向产生热误差 Δx 。 Δx 由 S_1 、 S_3 测量得到, 取其平均值作为热误差值。

Δz 、 Δx 随时间的变化规律如图 5b 所示, 其变化规律与图 4a 主轴箱温度变化规律基本保持一致。这说明主轴的热变形与主轴箱温度之间存在密切的关系: 随着主轴箱温度的升高, 主轴的热变形随之增大, 当温度最高时主轴的热变形达到最大值; 主轴停止旋转后主轴箱温度逐渐下降, 主轴的热变形也随

之减小。 S_1/S_3 的采集值偏差较大,这说明主轴在径向产生了偏摆,本文忽略了主轴在 x/y 方向的摆角问题。



(a) 主轴内部结构



(b) 主轴 x/z 方向热误差

图 5 主轴结构示意图及主轴 x/z 方向热误差

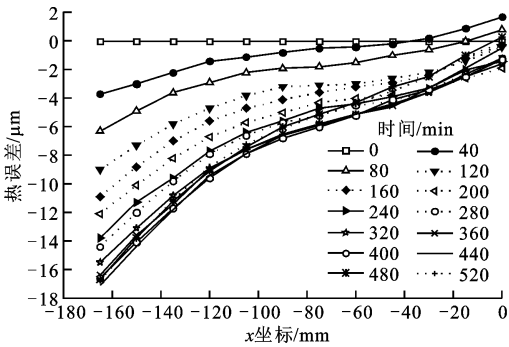
2.2.3 进给轴位置相关热误差分析 进给轴 x,y 具有同样的结构形式,两端分别为固定端和游动端。当进给系统运动时,电机、轴承、丝杠螺母副生热,导致进给轴丝杠受热膨胀,固定端位置不变,游动端向自由方向伸长,进给轴在本实验中的热变形如图 6 所示。

在冷态下第一次测量误差作为车床的几何误差,即第一次冷态测量时各测点的热误差为 0,图 6 说明各次测量的时间间隔,由图可以看出,进给轴的热误差与位置相关,两者之间近似成线性关系,且热误差随坐标位置的增大而增大。进给轴的固定端热误差变化相对较小,而游动端热误差变化相对较大,说明车床进给轴位置坐标距离电机越远,定位精度越低,热误差越大,这种变化规律符合丝杠的结构形式。电机端为丝杠的固定端,远离电机端为丝杠的游动端。

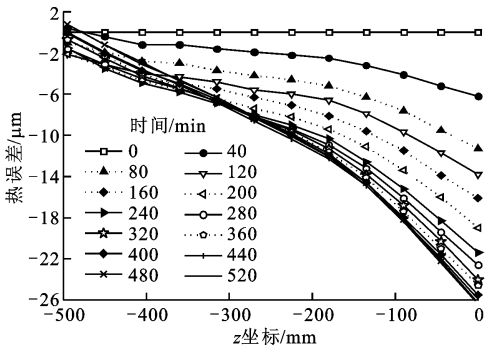
3 热误差的建模及补偿

3.1 温度测点优化

3.1.1 模糊聚类分组 利用模糊聚类分析方法^[17]对温度变量进行分组优化, $T=\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$ 是



(a) x 轴热误差



(b) z 轴热误差

图 6 x/z 轴热误差曲线图

全部温度变量,每一个对象 $T_i(i=1,2,\cdots,m)$ 均表示成 $T_i=(T_{i1},T_{i2},\cdots,T_{is})$,其中 $T_{ij}(j=1,2,\cdots,s)$ 是表示每一个温度变量对应的温度值。模糊聚类分析就是将样本 T 按照相似性划分成几类模糊子集,下面是进行模糊聚类的一般步骤。

(1)对原始数据 $T=\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$ 进行标准化处理,以平移标准差变换为例,变换后每个变量的均值为 0,标准差为 1,且消除了量纲的影响,即

$$T'_{ij} = \frac{T_{ij} - \overline{T_j}}{s_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, s; i = 1, 2, \cdots, m)$$

式中: $\overline{T_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ij}; s_j = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{ij} - \overline{T_j})^2 \right)^{1/2}$ 。

(2)设论域 $T=\{T_1,T_2,\cdots,T_m\}$, $T_i=(T_{i1},T_{i2},\cdots,T_{is})$ 。由模糊相似矩阵,得 T_i 与 T_j 的相似程度 $r_{ij}=\mathbf{R}(T_i,T_j)$ 。以相关系数法为例

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m |x_{ik} - \overline{x_i}| |x_{jk} - \overline{x_j}|}{\left(\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \overline{x_i})^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{k=1}^m (x_{jk} - \overline{x_j})^2 \right)^{1/2}} \quad (8)$$

式中: $\overline{x_i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ik}; \overline{x_j} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{jk}$ 。

(3)将模糊相似矩阵改造成等价矩阵,这里以传

递闭包法为例,因为 $\mathbf{R}$ 是 N 阶模糊矩阵,所以存在自然数 $k \leq N$,使得 $t(\mathbf{R}) = \mathbf{R}^k$,对于一切大于 k 的自然数 l ,有 $\mathbf{R}^l = \mathbf{R}$,当 $\mathbf{R}^{2k} = \mathbf{R}^k$ 时,便是一个模糊等价矩阵。

(4)根据等价模糊矩阵进行模糊聚类。根据工程实际经验确定精度系数 λ ,凡是 $r_{ij} \geq \lambda$ 元素为 1,否则为 0。

3.1.2 基于相关分析的温度测点筛选 依据上述模糊聚类分组结果,应用统计学相关性理论进行测点优化,求取 T_i 与热误差的相关系数为

$$\rho_{T_i E} = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - \overline{T_i})(E_j - \overline{E_j})}{(\sum_{j=1}^n (T_{ij} - \overline{T_i})^2)^{1/2} (\sum_{j=1}^n (E_j - \overline{E_j})^2)^{1/2}} \quad (9)$$

式中: T_{ij} 为测点温度值, $i=1,2,\cdots,m$ 为温度测点数, $j=1,2,\cdots,s$ 为测量次数; E_j 为热误差; $\overline{T_i}$ 为温度测点的平均值; $\overline{E_j}$ 为热误差的平均值。相关系数如表 1 所示,选择每个聚类分组中相关系数大的温度作为典型变量,故选择 T_{12} 和 T_{17} 为典型温度变量。

表 1 温度与 z 轴热误差相关系数

温度	聚类分组	$\rho_{T_i E}$	温度	聚类分组	$\rho_{T_i E}$
T_9	1	0.965 1	T_{12}	1	0.990 2
T_{10}	1	0.859 3	T_{17}	2	0.973 9
T_{11}	1	0.905 4			

表 1 数据是以其中一项热误差为例,实际中热误差包括主轴热伸长、主轴热升高、 x 进给轴热误差及 y 轴进给轴热误差,在进行模糊聚类时需要针对不同的热误差项分别进行聚类分组,得到与各个误差项最相关的典型温度变量。

3.2 热误差模型

温度变量优化之后可以进行热误差数学建模,主要有神经网络法、支持向量机法、多元线性回归等,本文以多元线性回归模型为例。

基于多元线性回归模型及实验数据,可得到热误差的数学补偿模型。分别建立车床主轴 x 方向热误差与 z 方向热误差、 x 进给轴及 y 进给轴的热误差补偿模型,即

$$\Delta K_{\text{spi1}} = K_{\text{spi1}}(T) = -1.752 + 1.102(T_1 - 20) + 1.291\Delta T_2 \quad (10)$$

$$\Delta K_{\text{spi2}} = K_{\text{spi2}}(T) = 5.526 + 3.451(T_1 - 20) + 3.783\Delta T_2 \quad (11)$$

$$\Delta K_{x1} = (P_x - P_{0x}) \tan \beta (T)_{.x} =$$

$$[0.004 + 0.007(T_1 - 20) + 0.014\Delta T_3](P_x - 0) \quad (12)$$

$$\Delta K_{z1} = (P_z - P_{0z}) \tan \beta (T)_{.z} = [0.005 + 0.0043(T_1 - 20) + 0.0051\Delta T_4] \cdot (P_z + 500) \quad (13)$$

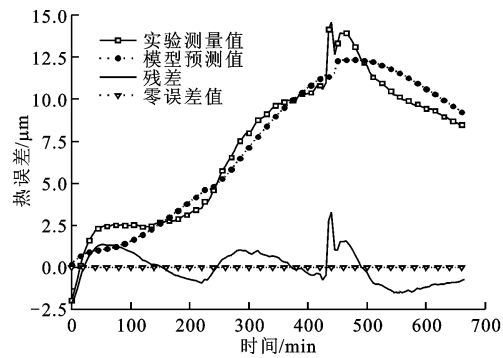
主轴热误差模型与 x/z 轴热误差模型的预测如图 7、图 8 所示。模型预测精度的评价标准采用均方根误差值、预测精度,分别为^[18]

$$\epsilon = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \widetilde{y}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

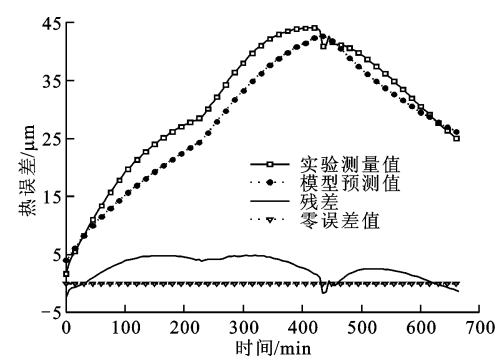
$$\eta = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \widetilde{y}_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \widetilde{y}_i|}{\sum_{i=1}^n |y_i|} \quad (15)$$

式中: y_i 为实验测量值; $\widetilde{y}_i$ 为模型预测值。

主轴 x/z 方向的热误差模型预测值的 ϵ 和 η 分别为 $0.9 \mu\text{m}/3.2 \mu\text{m}$ 和 $88.4\%/90.7\%$; x/z 轴热误差模型预测值的 ϵ 和 η 分别为 $1.4 \mu\text{m}/3.4 \mu\text{m}$ 和 $82.9\%/71.3\%$,证明了热误差模型具有很高的准确性,在工程实际中还需进一步验证。预测结果没有达到百分之百,是因为任何一种模型都存在自身的模型误差。此外,车床的误差包括伺服误差、插补误

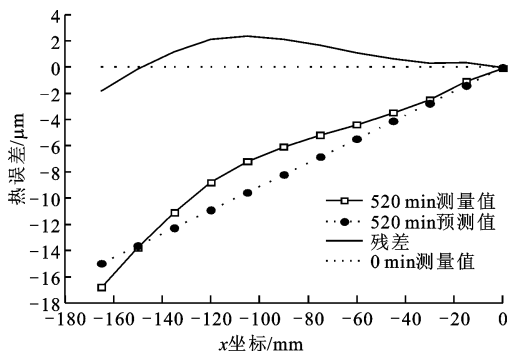


(a) 主轴 x 方向热误差

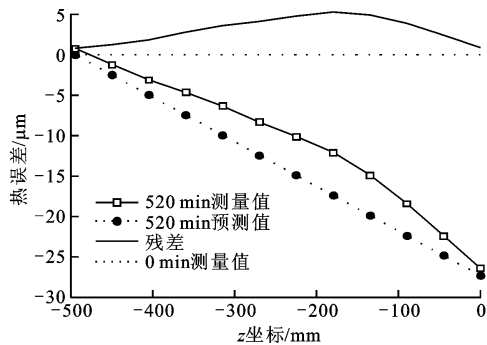


(b) 主轴 z 方向热误差

图 7 主轴热误差模型预测值与测量值的比较

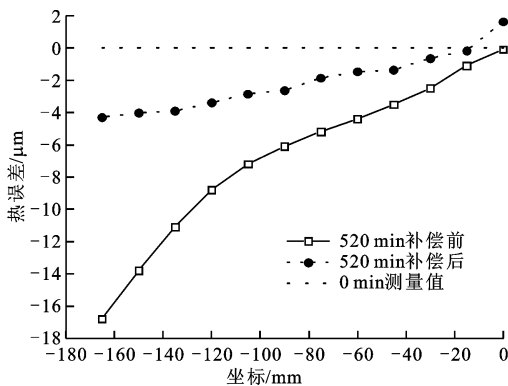


(a) x 轴热误差预测

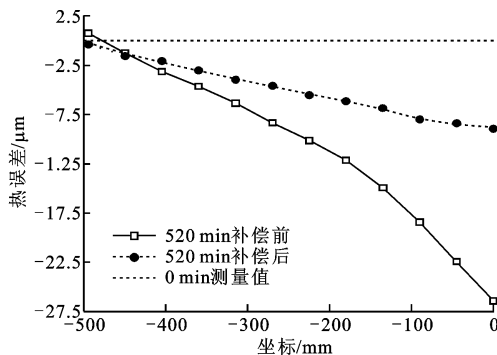


(b) z 轴热误差预测

图 8 x/z 轴热误差模型预测值与测量值的比较



(a) x 方向热误差补偿前后



(b) z 方向热误差补偿前后

图 9 x/z 轴热平衡下热误差补偿前后对比

差、跟随误差、几何误差、安装误差等,建模过程中这些系统误差未予考虑,都会导致预测模型精度降低。

3.3 车床热误差补偿工程应用

热误差补偿系统的总体结构设计主要由温度采集系统和可编程逻辑控制器(PLC)补偿系统两部分组成。温度采集系统用于获取热敏感点的温度值,并对采集的温度信号进行滤波、放大及 A/D 转换。获取温度之后在 PLC 内部根据前面的数学模型分别计算出每个轴的补偿参数 K_0 、 $\tan\beta$ 。PLC 将补偿参数通过 Siemens828D 数控系统内部特有的 PLC 与 NC 数据通信接口数据块 DB1200 写入 NC 系统内部,NC 系统会根据热误差补偿参数对车床各轴的插补指令做相应调整,从而提高了车床各轴的定位精度。

冷态下测量结束后根据实验测量原理开始运转车床,直至车床达到热平衡状态。车床在热平衡状态下补偿前和补偿后的热误差如图 9 所示。实验过程中主轴与进给轴同时运转,使得车床主轴与进给轴的热误差耦合在一起,从而验证了热误差耦合模型的准确性。补偿前 x/z 轴的定位精度为 $18.6\ \mu\text{m}/24.3\ \mu\text{m}$;补偿后 x/z 轴的定位精度为 $7.4\ \mu\text{m}/10.5\ \mu\text{m}$,补偿后 x/z 轴的定位精度提高了 60.3%/56.6%,充分验证了热误差耦合模型的准确性。

4 结 论

本文深入研究了车床热误差补偿理论及西门子 828D 数控系统热误差补偿机制,开发了基于 828D 的热误差补偿系统,运用多元线性回归与模糊聚类相结合的方法建立了车床各轴的热误差数学模型,并分析了主轴与进给轴之间热误差耦合与解耦过程,提出了主轴与进给轴之间的耦合模型,利用模糊聚类方法对温度测点进行了优化,通过选取热敏感点典型温度变量降低了温度变量之间多重共线性的问题,提高了热误差模型的预测精度。最后,将建好的主轴与进给轴耦合模型嵌入 PLC 中,在浙江海德曼车床厂生产的 HTC550/500 系列车床上得到实际应用,并且进行批量生产,车床在不同温度下的定位精度得到明显的提高,也为后期车床热误差的研究工作提供了重要依据。

参考文献:

- [1] BRYAN J B. International status of thermal error research [J]. Annals of CIRP, 1990, 39(2): 645-656.
- [2] 杜正春,杨建国,窦小龙. 制造车床热误差研究现状与思考 [J]. 制造业自动化, 2002, 24(10): 1-3.

- DU Zhengchun, YANG Jianguo, DOU Xiaolong. The research status and ponder about thermal error for machine tools [J]. *Manufacturing Automation*, 2002, 24(10): 1-3.
- [3] DONMEZ M A, HAHN M H, SOONS J A. A novel cooling system to reduce thermally-induced errors of machine tools [J]. *Annals of CIRP*, 2007, 56(1): 521-524.
- [4] MOU J. A method of using neural networks and inverse kinematics for machine tool error estimation and correction [J]. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119(2): 247-254.
- [5] MIN X, JIANG S. A thermal model of a ball screw drive system for a machine tool [J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2011, 225(1): 186-225.
- [6] YANG S, YUAN J, NI J. The improvement of thermal error modeling and compensation on machine tools by CMAC neural network [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(4): 527-537.
- [7] YANG Jun, SHI Hu, FENG Bin, et al. Applying neural network based on fuzzy cluster pre-processing to thermal error modeling for coordinate boring machine [J]. *Procedia CIRP*, 2014(17): 698-703.
- [8] YANG Jun, ZHANG Dongsheng, FENG Bin, et al. Thermal-induced errors prediction and compensation for a coordinate boring machine based on time series analysis [J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering* [2014-11-01]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/784218>.
- [9] WU C H, KUNG Y T. Thermal analysis for the feed drive system of a CNC machine center [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(15): 1521-1528.
- [10] LIN W Q, XU Y Z, FU J Z, et al. Thermal error modeling and compensation of spindles based on LS-SVM [C] // *International Technology and Innovation Conference*. London, UK: IET Conference Publications, 2006: 841-846.
- [11] 郭前建, 杨建国, 李永祥, 等. 聚类回归分析在滚齿机热误差建模中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(7): 1055-1059.
- GUO Qianjian, YANG Jianguo, LI Yongxiang, et al. Application of clustering regression analysis to thermal error modeling of gear hobbing machine [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(7): 1055-1059.
- [12] JIN Chao, WU Bo, HU Youmin. Temperature distribution and thermal error prediction of a CNC feed system under varying operating conditions [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015(77): 1979-1992.
- [13] 谢春, 张为民. 车铣复合加工中心综合误差检测及补偿策略 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1004-1011.
- XIE Chun, ZHANG Weimin. Comprehensive measurement errors of 5-axis turning-milling centers and their compensation strategies [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1004-1011.
- [14] ABDULSHAHED A M, LONGSTAFF A P, FLETCHER S. The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 27(2): 158-168.
- [15] 苗恩铭, 堇亚运. 支持向量回归机在数控加工中心热误差建模中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 980-986.
- MIAO Enming, GONG Yayun. Application of support vector regression machine to thermal error modelling of machine tools [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 980-986.
- [16] 杨军, 施虎, 梅雪松, 等. 双驱伺服进给系统热误差的试验测量与预测模型构建 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(11): 53-59.
- YANG Jun, SHI Hu, MEI Xuesong, et al. Measurement and modeling of thermal errors in the dual-drive servo feed system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*. 2013, 47(11): 53-59.
- [17] LEAHY R, WU Z. An optional graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation [J]. *IEEE Trans on PAMI*, 1993, 15(11): 1101-1113.
- [18] 杨军, 梅雪松, 赵亮, 等. 基于模糊聚类测点优化与向量机的坐标镗床热误差建模 [J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(8): 1175-1182.
- YANG Jun, MEI Xuesong, ZHAO Liang, et al. Thermal error modeling for a coordinate boring machine based on fuzzy clustering and SVM [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, 48(8): 1175-1182.

(编辑 赵炜 杜秀杰)