

DOI: 10.7652/xjtuxb201311010

双驱伺服进给系统热误差的试验测量 与预测模型构建

杨军, 施虎, 梅雪松, 冯斌, 赵亮, 张小红
(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: 为了研究双驱伺服进给系统热特性对数控机床精度的影响,建立了二元非线性综合热误差模型。以精密坐标镗床为对象,在不同进给速度下,利用激光干涉仪、红外热像仪及温度位移采集系统进行同步测量,对整机温度场分布、热变形的变化进行测试,分析进给系统热误差与丝杠特征温度、位置坐标及热平衡时间的非线性映射关系。结果表明:双驱结构易造成温度场梯度分布不均匀而产生热变形,热误差与丝杠特征温度成指数关系,且与坐标位置成线性关系;进给轴位置距离电机越远,定位精度越低,热误差越大,且热误差及热平衡时间随进给速度的提高而递增;热误差模型预测精度可达 85%,对不同工况具有较好的通用性。

关键词: 双驱进给系统;热变形;温度场;热误差模型

中图分类号: TH161;TG532 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0053-07

Measurement and Modeling of Thermal Errors in Dual-Drive Servo Feed System

YANG Jun, SHI Hu, MEI Xuesong, FENG Bin, ZHAO Liang, ZHANG Xiaohong
(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the effect of thermal characteristics of dual-drive feed system on CNC machine tool precision, a laser interferometer, an infrared thermography and a temperature displacement acquisition system are adopted to measure the distribution of temperature field and the thermal deformation at different feed rates for a high-precision CNC boring machine. The nonlinear relationships of thermal error with screw temperature, location coordinates and thermal equilibrium period are analyzed, and a comprehensive thermal error model is then proposed. It is found that an uneven distribution of temperature field gradient due to synchronous dual-drive structure leads to thermal deformation, the relationships of thermal error with screw temperature and location get as exponential and linear respectively. The farther the measured point is away from the motor, the lower the positioning precision is. Moreover, the thermal error and equilibrium period increase with the feed speed. The model prediction accuracy can reach 85% with perfect generality under different cutting conditions.

Keywords: dual-drive feed system; thermal deformation; temperature field; thermal error model

收稿日期: 2013-05-15。 作者简介: 杨军(1985—),男,博士生;施虎(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: 2013-09-06 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130906.1703.010.html>

目前,国产精密镗床的几何精度基本接近国际水平,其中直线坐标定位精度已达到 $3\text{ }\mu\text{m}$,重复定位精度可达 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,但随着用户使用时间的增长,精度逐渐下降且远远低于最初设计值,其问题主要集中表现为精密镗床精度的保持性及稳定性不足,而热误差是导致精度降低的主要因素之一,其中热误差约占机床总误差的 70% ^[1],并且机床越精密,热误差所占比例也越大。

由于数控机床温度场的非均匀分布,导致了热误差,且热误差具有时变非线性、非稳态特性,由热源位置、强度、膨胀系数以及机床结构的相互耦合产生了复杂的热特性^[2]。Chen 等人利用神经网络(ANN)给出了进给系统热误差与温度的关系^[3-5],模型虽具有较好的泛化能力,但物理解释性较弱,且预测能力严重依赖于学习样本。Min 以傅里叶热力学方程为基础,建立了包含多种边界条件的热态模型,并分析了不同热流密度下丝杠温度场梯度的分布特性^[6]。Kima 等人以直线电机进给系统为研究对象,阐述了导轨及直线光栅尺热变形对定位精度的影响规律^[7-8]。Wu 等人通过有限元方法(FEM)和仿真与试验相结合的方法,分析了预紧力及进给速度与丝杠温度场、热变形的相关关系^[9]。然而,精密数控机床热误差是诸多复杂因素相互耦合的结果,受多变量的影响,完全从传热学及热弹性力学角度建立理论方程十分困难。此外,以双驱伺服进给系统为对象研究热误差的文献也较少见报道。

本文以箱体类精密工作母机的精密数控坐标镗床为研究对象,进行热平衡试验,利用激光干涉仪、红外热像仪及温度位移采集系统进行同步测量,对整机温度场分布、热变形的变化进行测试,分析双驱结构和不同进给速度对精密镗床热特性的影响,并在试验基础上建立了热误差关于丝杆特征温度及坐标轴位置的综合数学模型。新的数据样本验证结果表明,该模型具有较高的预测准确度及很好的通用性等优点,为后续热误差补偿建立了精确模型,并为热平衡特征参数的设计提供了参考。

1 试验原理与设备

1.1 试验系统

以箱体类工作母机精密数控坐标镗床为研究对象,分析进给系统温度场及热变形的变化特性。镗床定位精度为 $3\text{ }\mu\text{m}$,重复定位精度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,X、Y、Z 三线性坐标轴均为同步双驱结构,行程范围为

$1\text{ }200\text{ mm}\times 1\text{ }000\text{ mm}\times 1\text{ }000\text{ mm}$,最大点位进给速度 $F=64\text{ m/min}$,实际加工最大进给速度 $F_s=45\text{ m/min}$,且丝杠为中空冷却结构。

测量系统如图 1 所示,用精密温度传感器 PT100 测量进给系统的电机、轴承、螺母座、导轨及环境等测点的温度,用高精度电涡流传感器测量丝杠末端热膨胀的变化量。

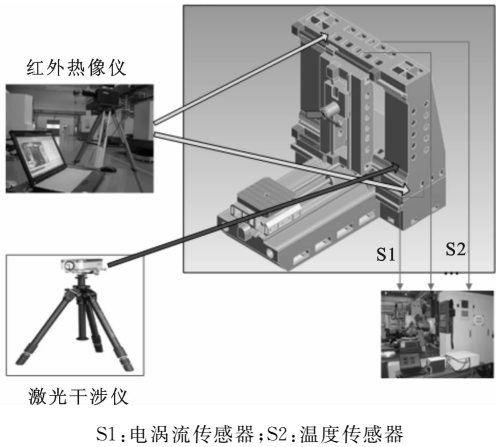
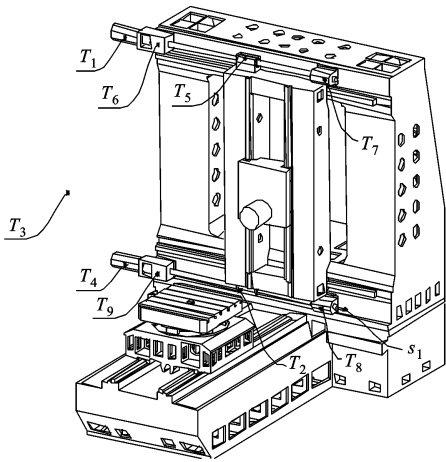


图 1 进给系统热特性测量系统的示意图

在机床上安装磁吸式温度传感器 PT100,电涡流位移传感器 S1,其位置温度如图 2 所示。



T_1 : X 轴上电机温度; T_2 : X 轴下端螺母温度; T_3 : 环境温度; T_4 : X 轴下端电机温度; T_5 : X 轴上部螺母温度; T_6 : X 轴上端前轴承温度; T_7 : X 轴上部后轴承温度; T_8 : X 轴下部后轴承温度; T_9 : X 轴下端前轴承温度; S_1 : X 轴下部丝杠末端热伸长量

图 2 传感器各安装位置上的温度示意图

1.2 测量原理

在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温试验室中,以 X 轴的 4 种进给速度为试验变量,测试参数见表 1。进给轴上为各测点的分布,测点范围为 $[-50\text{ mm}, -1\text{ }150\text{ mm}]$,各测点的间距为 100 mm ,共 12 个测点,坐标原点

为激光干涉仪的激光原点。

表 1 进给系统 X 轴的试验条件及测量参数

$F/$ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	$F_s/$ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	单次测量周期			t/min	N
		$t_1/$ min	$t_2/$ min	N_a		
6	0.5	30	10	3	590	14
12	0.5	30	10	3	630	15
18	0.5	30	10	3	590	14
24	0.5	30	10	3	525	16

注: t_1 为运行时间; t_2 为测量时间; N_a 为测量往复次数; t 为总测量时间; N 为总的测量次数。

进给系统在连续运行前,冷态下测量各测点误差为进给系统的几何误差,进给轴连续往复运行 30 min 后,测量的各测点误差(去掉几何误差)为本次测量的热误差^[9]。为避免进给系统运动生热影响测量结果,测量时将进给速度降为 0.5 m/min。依据 VDI/ISO 标准,机床在每个测点暂停 5 s,每次测量 3 个往复循环,激光干涉仪每个测点的测量时间为 2 s,3 个往复循环测量的总时间为 10 min。为防止反向间隙误差对测量的影响,设置反向越程为 2 mm。设 E_{ij}^k 为上丝杠第 i 个测点第 j 次测量中 3 个往复循环的第 k 次测量值,其中测点数 $i=1,2,\cdots,12$,测量次数 $j=1,2,\cdots,N$,单次测量进给轴的往复运动循环数 $k=1,2,\cdots,6$; E_{i0} 为丝杠第 i 个测点冷态时测量的几何误差,且

$$E_{i0} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 E_{i0}^k \tag{1}$$

则第 i 个测点的第 j 次热误差为

$$\Delta E_{ij} = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^6 (E_{ij}^k - E_{i0}^k) \tag{2}$$

设丝杠第 i 个测点第 j 次测量的温度值为 T_{ij} ,并由红外热像仪获得。丝杠第 j 次测量的特征温度为

$$T_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T_{ij}, \quad j = 1, 2, 3, \cdots, N \tag{3}$$

同时,利用温度热误差同步采集系统实时对 X 轴双驱结构的上下部电机、前后轴承、螺母座、环境温度,以及下部丝杠末端热膨胀量每秒进行一次数据采集。

2 试验结果及分析

精密数控机床热误差是诸多复杂因素相互耦合的结果,受多种变量影响,如加工方式、材料类型、加

工路径、环境温度、冷却系统、切削液、切削参数以及丝杠预紧力等,其中进给速度是关键的影响因素之一。本文通过试验,分析了不同进给速度下精密坐标镗床的热特性变化规律。由于热特性对环境温度敏感,为避免环境温度干扰,试验在 20℃ 的焔差室内进行。

2.1 进给系统整体温度场的分析

在恒定进给速度下,由图 3 可知,进给系统电机、轴承、螺母座的温度成周期性变化,由于单次运行时间为 30 min,测量时间为 10 min,且测量时进给速度降至 0.5 m/min 时,生成热量小于耗散热量,因此导致温度下降。当再次高速进给时,温度又逐步上升,温度呈现总体趋势上升而周期性变化的特征,温度波动循环周期约为 10 min,与测量时间吻合。

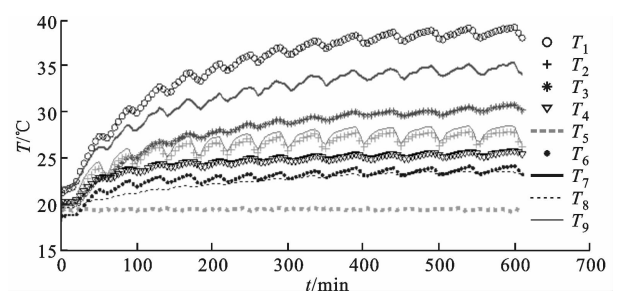


图 3 进给轴的温度曲线

如图 4 所示,进给系统 X 轴双驱动结构的上丝杠的电机温度最高,并且明显高于下丝杠的电机温度,同时 T_6 、 T_7 也分别高于 T_8 、 T_9 。这是由于上部电机为主动轴伺服电机控制端,下部电机为从动轴伺服电机控制端,主、从电机控制不能准确同步,而各自端丝杠与螺母间的摩擦特性也各异,且主动轴伺服电机控制端的功率及负载较大,生热量也增多,因此温度较高。热平衡时 T_1 高达 39.2℃,比 T_6 高 30.5℃,比 T_7 高 25.7℃。 T_4 也高于对应的 T_8 、 T_9 ,热平衡时 T_4 为 35.3℃,而 T_5 、 T_2 基本相等,热平衡时螺母座的温度为 28.6℃。因此,双驱

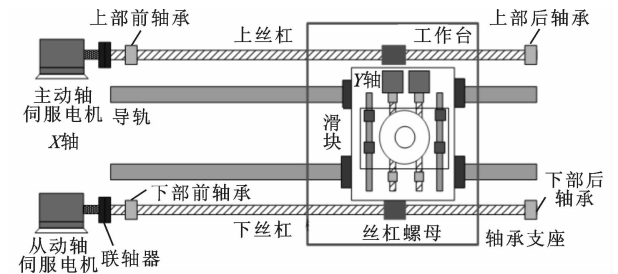


图 4 X 轴双驱动结构示意图

结构坐标镗床的上下丝杠、电机、轴承温度值的不同,导致进给系统温度场梯度分布不均匀,造成了热误差,从而影响了丝杠的定位精度及重复定位精度。如图 5 所示,丝杠上所有测点 p 的温度变化趋势一致,且均随时间的增加而逐渐升高,并最终达到热平衡状态。

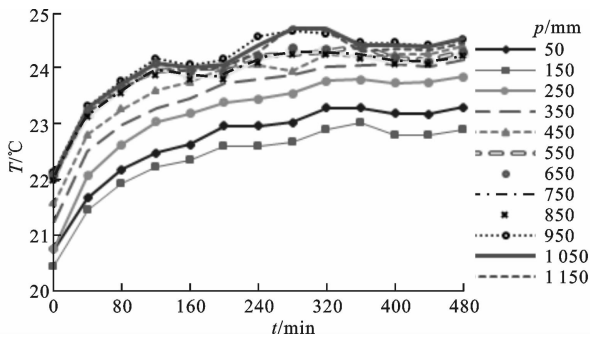
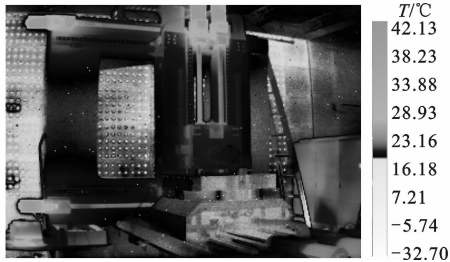
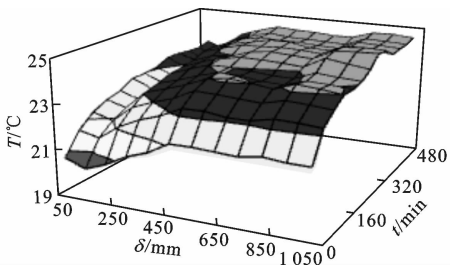


图 5 丝杠上各测点温度时间的变化曲线

上丝杠的测点温度在 $0\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围之间波动,而靠近电机端的测点温度略低于远离电机的自由端测点温度。由于红外热像仪发射率受光线等环境因素的影响,靠近电机端的机械结构较复杂易形成遮挡面,因此光线较暗,使电机近端比电机远端的温度低,引起测量系统误差。由图 6 可知,坐标位置 δ 、丝杠温度呈时变、非线性、非稳态缓慢变化特征,并与文献[2]吻合。



(a) 红外图谱



(b) 温度场图谱

图 6 丝杠的红外图谱及温度场图谱

2.2 上丝杠不同进给速度时的温度场比较

以丝杠上 1 050 mm 处的测点为研究对象,分

析不同进给速度下的温度变化规律。测点在热平衡时达到最高温度,并随进给速度增大而升高。由图 7、图 8 可见,当 $F=6\text{ m/min}$ 、热平衡时间约为 240 min 时达到热平衡状态,最高温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于此时的进给速度相对较小,丝杆与螺母及导轨与滑块间的摩擦较小,因此生热量也较小。采用中空循环冷却机制对丝杠进行实时降温,使得此工况下的丝杠温升接近于环境温度。当 $F=24\text{ m/min}$ 时,热平衡时间约为 380 min,但丝杠上 1 050 mm 处的测点温度却高达 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测点温度与进给速度具有非线性关系,在相同时间间隔内,进给速度越大,温升越大,且变化率也越大。同时,热平衡时间随进给速度的增大而增大。在实际加工工程中,热平衡时间可作为精密坐标镗床预热时间的参考值。

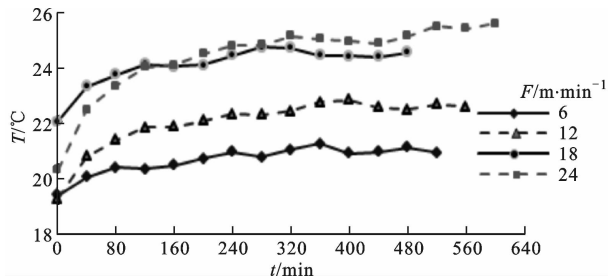


图 7 不同进给速度下温度随时间的变化曲线

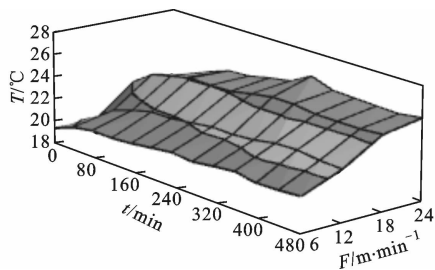


图 8 不同进给速度下的温度图谱

2.3 进给轴热误差特征分析

以进给速度 18 m/min 的试验数据为样本空间,分析精密坐标镗床进给系统热误差随时间及坐标位置 δ 的变化规律。试验中 X 轴坐标的范围为 $[50\text{ mm}, 1\text{ }150\text{ mm}]$,测点间距为 100 mm ,共 12 个测点,每个测点的位置误差由激光干涉仪测量获得,而丝杠末端的热膨胀量由电涡流位移传感器测得。

将 X 轴电机端作为正方向,远离电机端的自由端为 X 轴负方向。当 $F=18\text{ m/min}$ 时,进给轴上 12 个测点对应坐标位置的热误差由式(2)计算得出,热误差随时间的变化如图 9 所示。所有测点热误差的总体变化趋势一致,均随时间的增加而逐渐增大,且在热误差达到稳态时,其热平衡时间约为

530 min。在 50 mm 处的测点热误差为 $-3.3\ \mu\text{m}$ ，是所有测点中的最小值，而 1 150 mm 处的测点热误差最大，为 $-16.8\ \mu\text{m}$ 。进给轴的热漂移方向为 X 轴的负方向，即在加工过程中丝杠朝 X 轴自由端方向膨胀。由图 9 可知，测点距离电机位置越远，热误差越大，精密坐标镗床的定位精度也越低。

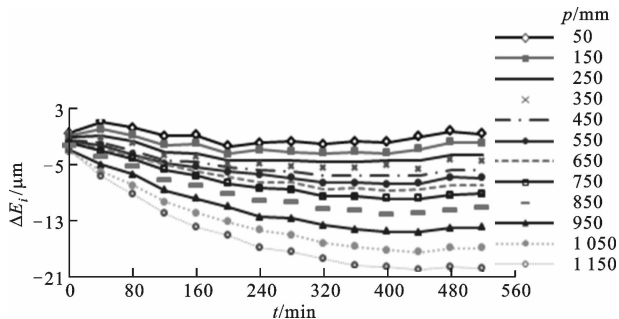


图 9 丝杠热误差随时间的变化曲线

2.4 丝杠末端热膨胀时间系列

当 $F=18\ \text{m/min}$ 时，图 10 为 S_1 的时间序列，丝杠末端朝 X 轴负方向膨胀伸长，且热膨胀变化率随时间的增长而急剧增大，在约 85 min 时达到热平衡，此时，末端轴向膨胀伸长量为 $20.3\ \mu\text{m}$ ，随后成周期性波动。当丝杠末端膨胀达到热平衡时， $\delta=1\ 150\ \text{mm}$ 处的测点最大热误差只有 $7.5\ \mu\text{m}$ ，远小于末端伸长量 $20.3\ \mu\text{m}$ 。比较图 9、图 10 可知，丝杠末端热膨胀的变化规律和进给轴坐标位置相关的热误差的变化趋势不一致，若精密数控坐标镗床 CNC 系统为开环控制，二者应基本一致，而不一致的原因是本次试验为全闭环控制方式，数控系统能自动补偿部分由丝杠热膨胀产生的螺距误差，二者并非简单的等价关系，所以造成曲线变化趋势不一致。因此，丝杠末端热伸长是整根丝杠热膨胀的积累效应，全闭环控制方式不能完全消除丝杠膨胀对定位精度的影响，尚有部分热误差不能消除，需借助热误差补偿或者热平衡设计等方式消弭。当 F 分别为 6、12 和 $24\ \text{m/min}$ 时，在热平衡 1 150 mm 处的测点热误差是所有测点中的最大值，其值分别为 8.6 、 10.3 和 $26.9\ \mu\text{m}$ 。当进给速度增加、电机功率增大、电机与轴承以及丝杠与螺母座等摩擦加剧、生热量增多时，会导致丝杠膨胀增强，从而引起热误差的增大。

2.5 进给轴测点热误差随位置的变化特性

当 F 为 $18\ \text{m/min}$ 时，丝杠温度场近似等温面，所以每次测量取所有测点温度均值为单次测量丝杠的特征温度，并由式(3)计算得出，如图 11 所示。由于冷态下的测量值为几何误差，因此记第 1 次测量

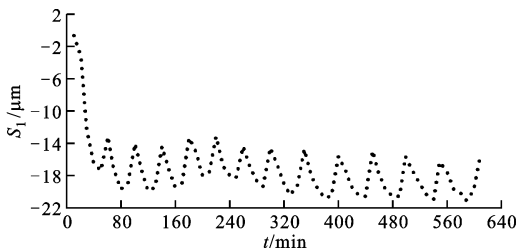


图 10 丝杠自由端的热伸长随时间的变化曲线

即 0 min 时各测点的热误差均为 $0\ \mu\text{m}$ ，丝杠温度场在 320 min 后达到热平衡状态，说明热误差相对温度场的变化过程具有较大的时间滞后性。如图 12 所示，同一测点的热误差与时间成非线性关系，由此验证了热误差与坐标位置相关且具有时变、非线性及非稳态的特征。

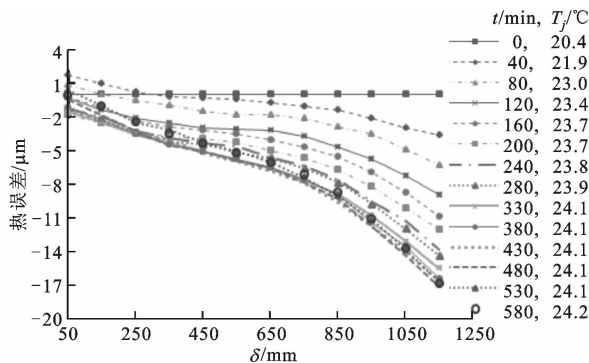


图 11 丝杠温度及热误差的变化曲线

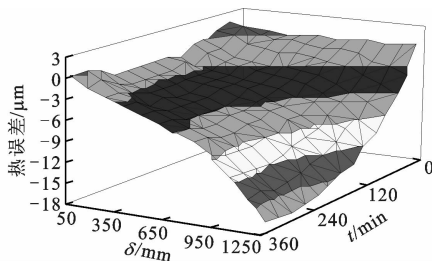


图 12 丝杠随热误差、位置及时间的变化图谱

3 进给轴热误差建模

3.1 热误差建模方法

进给系统热误差与温度及坐标位置等参数相关^[10-11]，通过对试验数据的分析，由精密坐标镗床进给轴热误差与热平衡时间、坐标位置及丝杠特征温度的映射函数，构造了热误差的综合数学模型，并以新的数据样本来预测热误差。

3.1.1 热误差的时间函数 图 13 为 $\delta=1\ 150\ \text{mm}$ 时的测点热误差与时间 t 的拟合曲线，热误差为时间的二阶指数函数，即

$$\Delta E_{12}(t) = -33.43e^{-0.00082t} + 33.35e^{-0.00367t} \quad (4)$$

将决定系数记为 R_s , 其边界域为 $[0, 1]$, 表示原始数据在一定的置信区间内落在拟合曲线上的程度, 其值越大, R_s 拟合曲线越接近原始数据。将拟合值与实测值的残差均方根记为 R_m , 表示拟合曲线与原始测量数据的接近程度, 值越小(接近 0)原始数据越集中在拟合曲线上或曲线两边。由计算得到 $R_s = 0.999$, $R_m = 0.1985$ 。

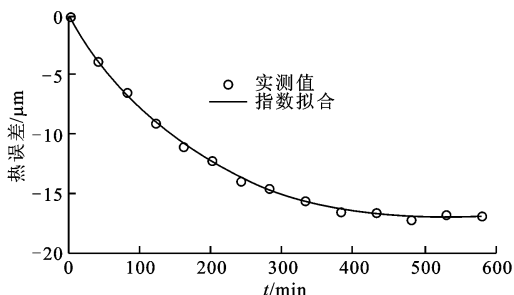


图13 测点热误差的时间拟合曲线

3.1.2 热误差的坐标位置函数 以精密工作母机最后一次的测量数据作为样本空间建模, 由式(3)计算得出丝杠特征温度为 24.2°C , 各测点热误差的分布如图14所示。利用线性逼近方法求解得到

$$\Delta E_{i,14} = -0.014P_x + 1.549 \quad (5)$$

式中: $\Delta E_{i,14}$ 为第 i 个测点第 14 次测量的热误差; P_x 为第 i 个测点的坐标位置。当 R_s 为 0.945 2、 R_m 为 1.254 8 时, 表明模型拟合效果较好, 即在同一时刻, 丝杠热误差与坐标位置的线性关系显著。假设丝杠上存在热误差恒为 0 的坐标点, 将该点作为参考点 P_0 , 当 $\Delta E_{i,14} = 0$ 时, 由式(5)得

$$P_0 = 112.409 \text{ mm} \quad (6)$$

3.1.3 热误差关于温度的函数 丝杠末端热伸长是整根丝杠前部分膨胀的积累, 将丝杠简化成线性杆, 而线性杆的最大热误差量与温度相关, 丝杠热误差关于温度的指数拟合曲线如图15所示, 其函数表达式为

$$\Delta E_{12,j} = -3.049 \times 10^{-8} e^{0.835T_j} \quad (7)$$

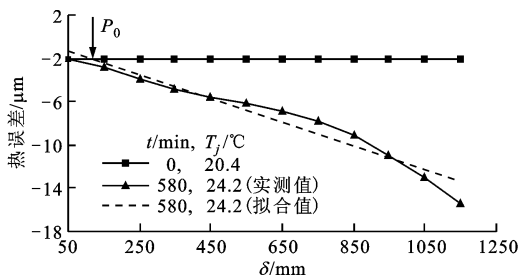


图14 580 min时丝杠热误差随位置变化的曲线

式中: $\Delta E_{12,j}$ 为 1150 mm 处的测点热误差。

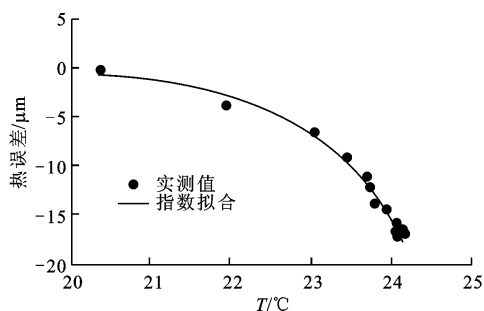


图15 丝杠热误差的温度拟合曲线

3.1.4 热误差综合模型 假设相同温度下丝杠单位长度热变形量相等, 其比例方程为

$$\frac{\Delta E_{x,j}}{P_x - P_0} = \frac{\Delta E_{12,j}}{1150 - P_0} \quad (8)$$

式中: $\Delta E_{x,j}$ 为 T_j 时 P_x 处的热误差, 联立式(6)~式(8), 得

$$\Delta E_{x,j} = -2.937 \times 10^{-8} e^{0.835T_j} (P_x - 112) \quad (9)$$

3.2 模型验证

采用式(9)所建立的热误差模型, 预测 480 min 时进给轴各测点的热误差, 并与实测值的比较如图16所示。当 $T_j = 24.1^\circ\text{C}$ 、 $R_m = 1.283$ 、残差绝对值均值为 $1.15 \mu\text{m}$ 、测点原始热误差绝对值均值为 $7.375 \mu\text{m}$ 时, 计算出的模型预测精度约为 85%, 表明所建立的数学模型预测精度较高。

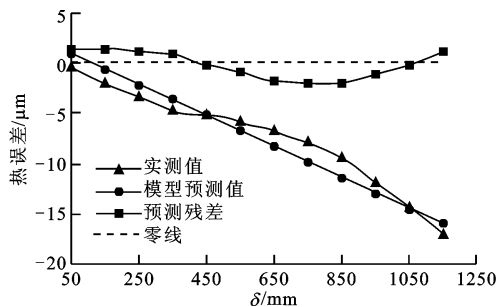


图16 热误差实测值与模型预测值的比较

4 结论

本文通过对精密数控坐标镗床的温度场及热误差场进行测试, 以及对热误差预测模型的计算, 得出如下结论。

(1) 温度场及热误差场总体呈时变、非线性、非稳态缓慢变化特征, 试验中温度场热平衡时间为 320 min, 小于热漂移平衡时间 530 min, 表明丝杠温度场具有缓慢变化过程, 且热漂移具有相对滞后性的热特性。丝杠热误差与位置坐标近似线性关

系,与时间成二阶指数关系,且为丝杠特征温度的一阶指数函数。

(2)精密数控坐标镗床的 3 个线性坐标轴均为同步双驱动结构,如果进给轴的每根丝杠负载、预紧力不平衡,以及双驱动结构中电机伺服控制不能精确同步,就容易造成温度场梯度分布不均匀,从而导致丝杠线膨胀或平面热弯曲甚至立体空间上的扭曲,并最终形成热误差,降低了工作母机的加工精度。

(3)丝杠末端热伸长是整根丝杠热膨胀的积累效应,精密数控坐标镗床全闭环控制方式能消除部分热漂移,但不能彻底消除丝杠因热膨胀造成的与位置相关的热误差,且进给系统在 X 轴上的位置距离电机越远,定位精度越低,热误差就越大。

(4)进给速度增大,摩擦生热量增大,从而导致丝杠膨胀加剧,使得位置相关热误差随之增大。丝杠上各测点及电机轴承等关键功能部件的温度与进给速度成非线性变化规律,热平衡时温度随进给速度的增大而增大,且温度场热平衡时间亦随之变长。因此,在实际加工工程中,温度场的热平衡时间可作为精密坐标镗床预热时间的参考值。

(5)本文建立的进给轴热误差预测模型能够准确预测丝杠位置的相关热误差值,且模型具有较好的通用性,从而为后期热误差补偿、精密坐标镗床热平衡的设计提供了重要依据。

参考文献:

- [1] BRYAN J B. International status of thermal error research [J]. Annals of CIRP, 1968, 16(1): 203-215.
- [2] 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(18): 247-254.
- [3] CHEN J S, CHIOU G. Quick testing and modeling of thermally-induced errors of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(7): 1063-1074.
- [4] 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.

- [5] CHEN J S. Fast calibration and modeling of thermally-induced machine tool errors in real machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 35(2): 159-169.
- [6] MIN X, JIANG S. A thermal model of a ball screw drive system for a machine tool [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011(11): 186-225.
- [7] KIMA J J, JEONG Y H, CHO D W. Thermal behavior of a machine tool equipped with linear motors [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(8): 749-758.
- [8] UHLMANN E, HU J M. Thermal modeling of an HSC machining centre to predict thermal error of the feed system [J]. German Academic Society for Production Engineering, 2012, 25(6): 603-610.
- [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 and Manufacture, 2003, 43(15): 1521-1528.
- [10] SRIVASTAVA A K, VELDHUIS S C, ELBESTAWIT M A. Modeling geometric and thermal errors in a five-axis CNC machine tool [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(9): 1321-1337.
- [11] SIEMENS. SINUMERIK840D sl/840di sl/840d/840 di/810D extended functions [EB/OL]. [2012-12-26]. <http://www.siemens.com>.

[本刊相关文献链接]

- 赵飞,梅雪松,姜歌东,陶涛,邢铭宗.数控机床进给系统模态参数的自激振辨识方法. 2013, 47(5): 88-92. [doi: 10. 7652/xjtuxb201305016]
- 杨晓君,赵万华,刘辉,张会杰.直线电机进给系统机械系统动态特性研究. 2013, 47(4): 44-50. [doi: 10. 7652/xjtuxb201304009]
- 殷咸青,孙江涛,张建勋.纵向磁场作用下的钨极氩弧焊电弧温度场. 2013, 47(3): 85-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb201303016]
- 何联格,左正兴,向建华.气缸盖中两相流沸腾换热热机耦合仿真分析. 2013, 47(7): 23-28. [doi: 10. 7652/xjtuxb201307005]
- 吴沁,芮执元,杨建军.考虑非线性弹性力的滚珠丝杠系统分岔与混沌特性分析. 2012, 46(1): 70-75. [doi: 10. 7652/xjtuxb201201013]

(编辑 管咏梅)