

镗铣加工中心主轴系统热误差测量实验研究

孙 军,孔碧溪,张 祥,吴方凯

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 通过对 TX1600G 复合式镗铣加工中心主轴部件热误差测量实验研究,找到主轴热关键点位置,检测其温升情况以及其热变形,进而确定产生热误差的主要影响区域. 方法 设计温度与热误差测量实验方案,采用红外热像仪布置和优化温度测点,并采集温度数据,对比各位置测点的温升情况确定热关键点;采用 API 主轴分析仪测量 X、Y、Z 三个方向的热变形值,对比数据进而确定热变形最大的方向. 结果 主轴在转速 3 000 r/min 下,当实验达到热平衡时,Z 向热伸长最大;主轴中部的前后端轴承位置的温升较大,为热关键点,且 Z 向热变形曲线与温升曲线的趋势基本相同. 结论 加工中心主轴在实际运行中的误差主要是由温升引起的轴向热伸长误差,控制 Z 向伸长热变形能有效地提高加工精度.

关键词 镗铣加工中心;主轴系统;热误差;热关键点

中图分类号 TH161;TG65

文献标志码 A

Experimental Study on Thermal Error Measurement of Spindle System of Boring and Milling Machining Center

SUN Jun, KONG Bixi, ZHANG Xiang, WU Fangkai

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose is to find the position of the thermal key point of the spindle, detect the temperature rise and its thermal deformation and further determine the main area influenced by the thermal error by research on the thermal error measurement of the spindle of the TX1600G composite boring machining center. The temperature and thermal error measurement acquisition scheme is designed, and the temperature measurement points are arranged and optimized by infrared thermal imager. The temperature data are collected and the thermal key points are determined by comparing the temperature rise of each measuring point. The thermal deformation of XYZ in three directions was measured by the API spindle analyzer, and the relative data were determined by the comparison data. The results showed that Z direction is the largest thermal elongation direction in the case of the spindle speed of 3 000 r/min and the achieved thermal balance. The temperature rise of the front and rear bearing positions in the middle of the spindle is larger, which is the ther-

收稿日期:2017-05-08

基金项目:国家 863 计划项目(SS2012AA041303);辽宁省科技计划项目(2013220017)

作者简介:孙军(1963—),男,教授,主要从事数字化制造应用技术等方面研究.

mal key points. The Z-direction thermal deformation curve is basically the same as the temperature rise curve. The conclusion is that the deviation in actual application of the main shaft for machining center is caused by the thermal expansion in axial direction when the temperature is rising. Therefore, it can effectively increase the processing precision through the coercion of thermal expansion and deformation in Z-direction.

Key words: boring-milling machining center; spindle system; thermal error; thermal key points

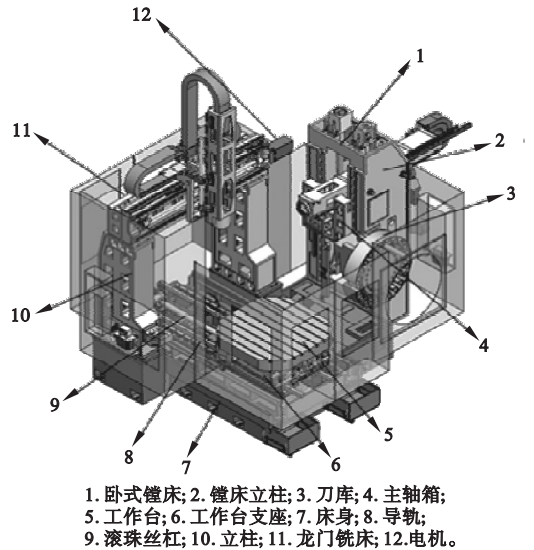
数控机床作为机械制造装备业中重要的生产工具,它的精度指标直接决定了整个制造装备业甚至一个国家的工业发展水平,因此,改善数控机床的加工精度成为了如今研究热点.在各种高速、精密机床加工过程中,导致误差的原因有多种,其中由热变形导致的误差问题尤其突出^[1-2].热误差不仅在机床加工中普遍存在,而且还严重影响零件加工精度.经大量研究发现,机床热误差的主要影响因素之一是主轴系统热误差^[3],而且主轴是数控机床的关键部件,因此对主轴热误差的研究已成为当前的研究热点.

提高加工精度的关键技术之一是热误差建模及补偿技术^[4-6],而实现这两点的前提和关键是温度测点的优化技术.温度测点的选择不仅影响着传感器的使用数量,而且对模型的预测精度也存在很大影响^[7-9].在目前应用的热误差补偿系统中,对测温点的选择和布置很多时候是依据经验来判断的,这样存在一定的不足.因此一些学者根据有限元分析结果判断热源位置^[10-12],还有些研究者根据潜在热源并结合机床热变形的测量实验来选择最优的温度测点^[13].杨建国等^[14]在温度测点布置与热误差补偿两个方面均进行了深入研究,他们将温度变量进行分组,把其中相关性高的分为一组,提高了温度变量的选择效率,可以简单快速地建立补偿模型.杨昌祥等^[15]通过对数控机床的热模态分析,得到了主轴热模态时间常数和温度场分布,并以此为根据确定温度传感器的放置位置.郭丰等^[16]在自主搭建的数控机床热误差补偿实验平台上采集机床关键部位的温度数据,利用激光干涉仪采集热误差数据,并将这

两种数据在计算机上进行优化和关联分析,最终选出热关键点. J. Mayr 等^[17]用红外摄像机获得了滚珠丝杠温度分布的热图像,实验结果表明这种方法可以清楚地观测到丝杠的热变化及热敏感区.基于此,笔者针对 TX1600G 复合式镗铣加工中心镗削系统主轴部分,采用红外热像仪和 API 主轴分析仪分别测量温度和热变形,根据测量结果确定主轴热关键点的位置,分析温度变化规律以及热变形规律.这些规律可以为进一步研究热误差补偿奠定基础,对改善数控机床的加工精度有一定意义.

1 TX1600G 数控镗铣加工中心

TX1600G 镗铣加工中心的三维结构示意图如图 1 所示.



1. 卧式镗床; 2. 镗床立柱; 3. 刀库; 4. 主轴箱; 5. 工作台; 6. 工作台支座; 7. 床身; 8. 导轨; 9. 滚珠丝杠; 10. 立柱; 11. 龙门铣床; 12. 电机。

图 1 TX1600G 三维结构

Fig. 1 Three - dimensional structure of TX1600G

TX1600G 镗铣加工中心主要由图 1 所示的 12 个部分组成,高精度的工作台安装在

水平运动滑台上,大功率伺服电机和高刚度大螺距丝杠安装在工作台下方,来驱动X、Y、Z三轴的运动。TX1600G 镗铣加工中心主轴结构如图2所示,TX1600G 主轴部件主要由图中所示的7部分组成,其中前支轴承和后支轴承为角接触球轴承。

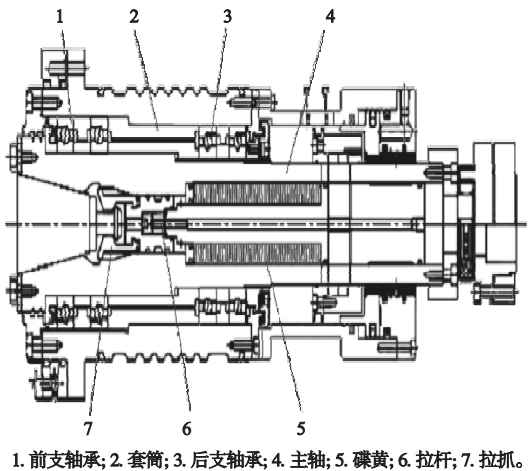


图2 TX1600G 主轴结构

Fig.2 Spindle structure of TX1600G

2 主轴热检测方案

2.1 主轴总体采集系统方案

主轴系统温度及热误差现场测试环境如图3所示。测试现场室温在大约13℃,实验环境良好。



图3 主轴系统温度及热误差现场测试环境

Fig.3 Temperature and thermal error test environment of spindle system

温度场和热误差检测总体采集系统方案由图4所示。主轴热误差实验检测系统主要由红外热像仪、API 主轴分析仪和计算机组成。由红外热像仪和 API 主轴分析仪采集的温度以及热误差,通过相关分析软件直接变成计算机识别的数字信号,从而获取其温度和热误差数据。

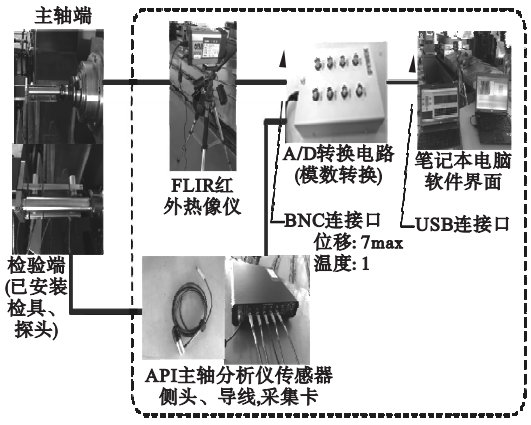


图4 温度场和热误差检测系统总体方案

Fig.4 The overall scheme of temperature field and thermal error detection system

2.2 主轴温度场检测方案

机床是一个复杂的热态系统,其温度场的分布受很多因素影响,必须获取大量合理的温度数据才能获得比较真实的温度场用于后续误差补偿模型的建立。但是布置过多的传感器,还需要利用统计分析的数学方法对传感器进行筛选,这样会导致不必要的传感器的浪费,而且会增加辨识时间。而过少的温度测点会造成测量结果不准确,不能够如实的反应温度场的变化情况^[18]。因此,采用红外热像仪获取整个主轴动态的温度数据图像,进而选择合适的测温点数量与布置位置,这样可以避免冗余传感器间互相耦合干扰,使检测的灵敏度得以提高^[19],也可以进一步提高补偿精度。

实验中,根据仿真结果^[20-24]可以确定TX1600G 主轴的基本热源位置。实验时先均匀布置22个温度测点(见图5),对其进行温度数据采集,观察热误差敏感区。布点位置分

别用于测量检棒端 (SP01, SP02)、刀柄端 (SP03, SP04, SP05)、主轴前轴承端面 (SP06, SP07, SP08, SP09, SP10)、前轴承座表面 (SP11, SP12, SP13)、主轴中部表面 (SP14, SP15, SP16)、后轴承座表面 (SP17, SP18, SP19)、主轴后轴承端面 (SP20, SP21, SP22)、室温 (SP23),之后再根据热像仪采集得到的温度数据进行比较,选取出主轴上的热敏感点进行热分析.各测点的位置说明如表 1 所示.

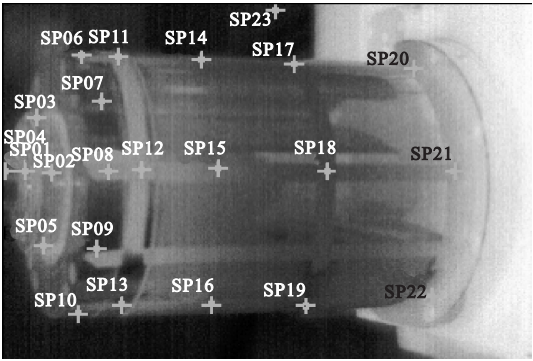


图 5 主轴温度布点

Fig. 5 The spindle temperature points

表 1 温度测点位置说明

Table 1 The position description of temperature measuring points

| 温度测点编号 | 位置 | 功能 |
|------------------------------|--------|------------|
| SP01, SP02 | 检棒端 | 测量检棒两端温度 |
| SP03, SP04, SP05 | 刀柄端 | 测量刀柄端温度 |
| SP06, SP07, SP08, SP09, SP10 | 前轴承端面 | 测量前轴承端面温度 |
| SP11, SP12, SP13 | 前轴承座表面 | 测量前轴承座表面温度 |
| SP14, SP15, SP16 | 主轴中部表面 | 测量主轴中部表面温度 |
| SP17, SP18, SP19 | 后轴承座表面 | 测量后轴承座表面温度 |
| SP20, SP21, SP22 | 后轴承端面 | 测量后轴承端面温度 |
| SP23 | 空气 | 测量室温(参考温度) |

2.3 主轴热误差检测方案

API 主轴热变形分析仪安装布置如图 6 所示.

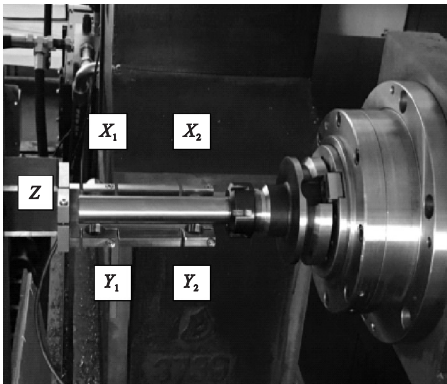


图 6 API 主轴热变形分析仪安装布置

Fig. 6 The installation of API spindle thermal deformation analyzer

主轴热变形的检测通过主轴分析仪和连接到主轴的标准检棒在 X、Y、Z 3 个方向布置

5 组测点,其中 2 组传感器测量 X 方向上(近主轴端 X_2 ,远主轴端 X_1)的热变形,2 组传感器测量 Y 方向上(近主轴端 Y_2 ,远主轴端 Y_1)的热变形,Z 向热误差(热伸长)由布置在检棒外侧端面上的 1 组传感器测量.信号经过控制器、数据采集卡,最终通过热误差测试软件记录在计算机上.

3 主轴系统热误差实验及数据分析

3.1 主轴温度及热变形数据采集

实验检测时,加工中心主轴上要安装 $\Phi 45 \times 300$ mm(尺寸可适当调整)规格的检棒,热变形测试时每隔 60 s 采集一次数据.镗铣加工中心主轴最高转速允许值为 6 000 r/min,为了保证加工中心在高速运转时的安全性和稳定性,在进行主轴温升及热变

形试验时,将最高运行转速设为 3 000 r/min.

3.2 瞬态温度场测试结果

实验中的温度场数据是在前期大量实验准备和测量工作的基础上,在相对稳定的主轴运转情况和良好的工作环境中获取的.通过前期温度场测量实验,寻求到对热误差影响最大的热敏感区域集中在主轴的前轴承处、中部和后轴承处,由此将原来的 22 个测温点减少到 9 个,表 2 所示为关键点位置分布.测试开始时主轴温度分布如图 7 所示,结束时如图 8 所示,图中“十”字点为主轴上的热敏感点分布.

实验过程中主轴上 9 个热关键点按布置位置分别对比得到的温升图如图 9 ~ 图 11 所示.图 12 为主轴中部的前端、中部和后部的热关键点随时间变化的温升对比图,图中 SP01 代表主轴前部,SP02 代表主轴中部,SP03 代表主轴后部.

表 2 主轴上热敏感点分布

| Table 2 Thermal sensitive point distribution on spindle | | | |
|---|--------|------|--------|
| 部位 | 主轴前轴承处 | 主轴中部 | 主轴后轴承处 |
| 主轴上部 | SP04 | SP05 | SP06 |
| 主轴中部 | SP01 | SP02 | SP03 |
| 主轴下部 | SP07 | SP08 | SP09 |

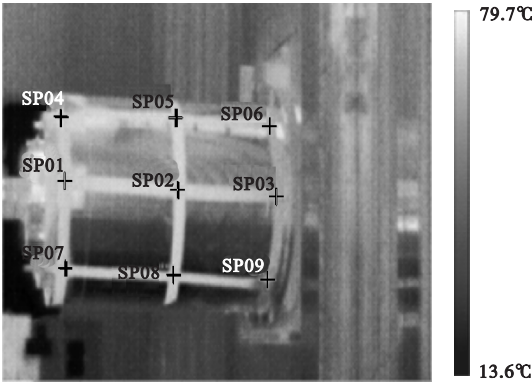


图 7 主轴系统初始状态下的温度分布图

Fig. 7 The temperature distribution of the spindle system in the initial state

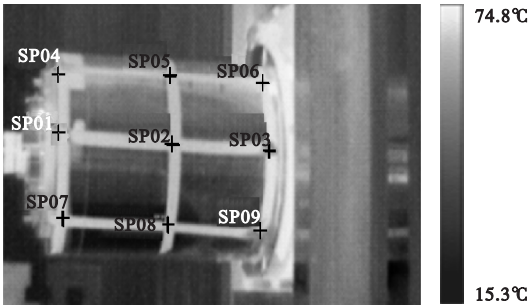


图 8 主轴系统热测试结束时的温度分布图

Fig. 8 The temperature distribution of the spindle system in the final state

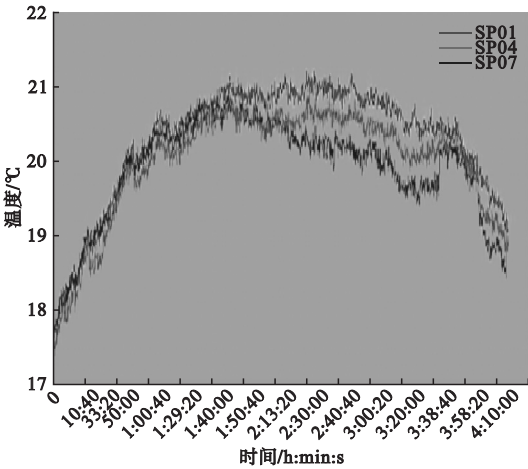


图 9 主轴前端温升曲线

Fig. 9 The temperature rise curve at the front portion of spindle

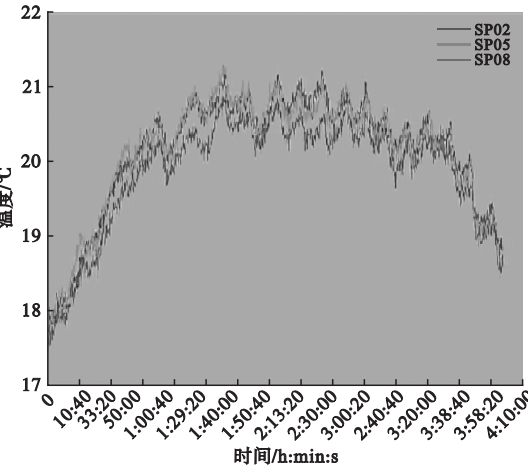


图 10 主轴中部温升曲线

Fig. 10 The temperature rise curve at the middle portion of spindle

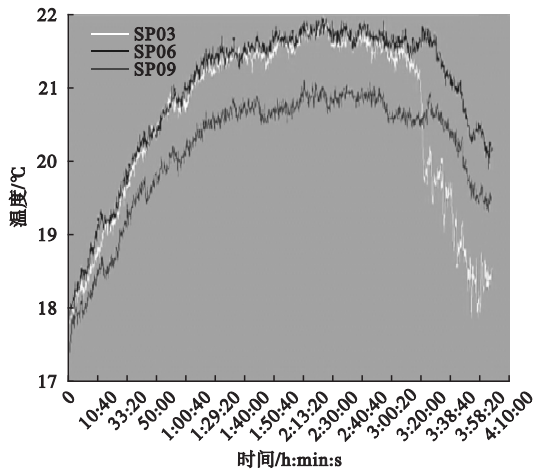


图 11 主轴后部温升曲线

Fig. 11 The temperature rise curve at the rear portion of spindle

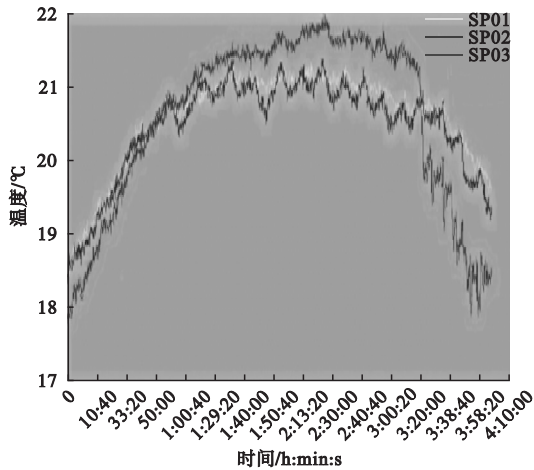


图 12 主轴中部前、中、后温升对比曲线

Fig. 12 The temperature rise contrastive curve of the central spindle at the front, middle, and rear portions

在图 9 ~ 图 12 中的温度曲线呈抛物线形,数据是在 4 h 内连续采集的. 在测试到 1 h 40 min 左右时主轴系统达到热平衡状态,在 3 h 20 min 左右时主轴停止旋转,开始降温过程.

3.3 主轴热变形测试结果

主轴转速为 3 000 r/min,在图中横坐标 60 000 (200 min × 60 × 5) 点左右主轴停转. 主轴在 X 方向上近主轴端 X2 和远主轴端 X1 的热变形随时间变化曲线如图 13 所示,Y 方向上近主轴端 Y2 和远主轴端 Y1 的热变形随时间变化曲线如图 14 所示,轴向(Z 向)的热

变形随时间变化曲线如图 15 所示.

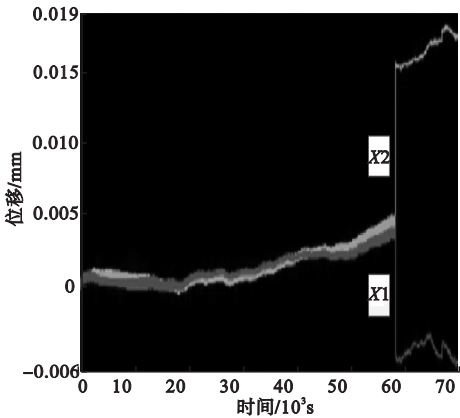


图 13 主轴 X 方向热变形 - 时间曲线

Fig. 13 Thermal deformation-time curve of the spindle in the X direction

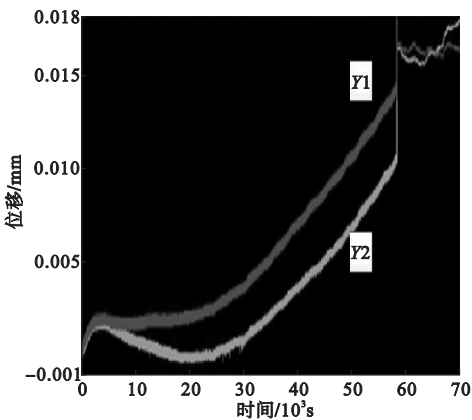


图 14 主轴 Y 方向热变形 - 时间曲线

Fig. 14 Thermal deformation-time curve of the spindle in the Y direction

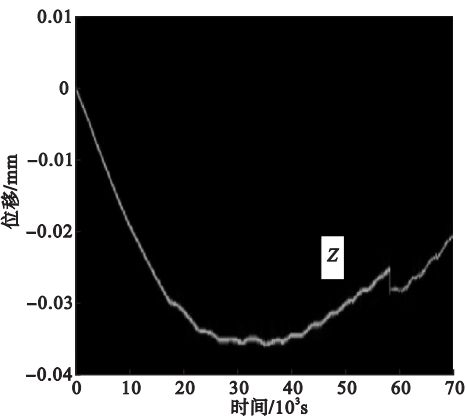


图 15 主轴轴向(Z 向)热变形 - 时间曲线

Fig. 15 Thermal deformation-time curve of the spindle in the Z direction

3.4 瞬态温度场分析

由温升曲线可知,主轴在转速为 3 000 r/min,运行时间为 4 h 的工况下,在达到热平衡一段时间后,主轴停转同时整体温度开始下降,因此主轴上不同位置的温度值随时间呈现抛物线形的变化趋势,其中主轴后部温升变化最明显. 总之,主轴温度变化不是很

大,从实验数据中可以看出,主轴在转速为 3 000 r/min运行 240 min 的实验期间,整个主轴上最高温度达 21.8 ℃,最低为 16.1 ℃. 主轴在不同位置同一时刻的温度差在1 ℃左右,温差相对较小,主轴在同一位置不同时刻的最大温差在 5 ℃左右. 环境初始温度为 13 ℃左右,主轴不同位置温升测量结果如表 3 所示.

表 3 主轴不同位置温升测量结果

| Table 3 The results of the spindle temperature rise measurement at different location | | | | | | | | | | |
|---|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| 主轴运转 时间/min | 测温点温度值/℃ | | | | | | | | | 最大 温差/℃ |
| | SP01 | SP02 | SP03 | SP04 | SP05 | SP06 | SP07 | SP08 | SP09 | |
| 0 | 16.6 | 16.2 | 16.3 | 16.5 | 16.1 | 16.3 | 16.5 | 16.3 | 16.2 | 0.4 |
| 0 | 17.3 | 17.0 | 17.1 | 17.4 | 17.1 | 17.0 | 17.2 | 17.1 | 17.1 | 0.4 |
| 60 | 18.7 | 18.2 | 18.8 | 18.7 | 18.2 | 18.8 | 18.6 | 18.3 | 18.7 | 0.6 |
| 90 | 19.8 | 19.0 | 19.4 | 19.8 | 19.0 | 19.4 | 19.8 | 19.0 | 19.4 | 0.8 |
| 120 | 21.8 | 21.0 | 21.4 | 21.7 | 20.9 | 21.4 | 21.7 | 20.9 | 21.4 | 0.9 |
| 150 | 21.2 | 20.0 | 21.0 | 21.2 | 20.0 | 21.0 | 21.2 | 20.0 | 21.0 | 0.2 |
| 180 | 20.5 | 19.5 | 20.3 | 20.5 | 19.5 | 20.3 | 20.4 | 19.4 | 20.2 | 1.1 |
| 210 | 19.6 | 19.0 | 19.2 | 19.6 | 19.0 | 19.2 | 19.6 | 19.0 | 19.2 | 0.6 |
| 240 | 18.8 | 18.2 | 18.6 | 18.9 | 18.3 | 18.6 | 18.8 | 18.2 | 18.7 | 0.7 |

从表 3 可以明显看出:主轴系统不同时间不同位置的温度变化情况,由此可得出主轴系统温升、温降都比较快,温升用时在 100 min 左右;主轴系统温度场一致性较好,主轴温度随时间变化不大,最大温升控制在 5 ℃左右,后轴承温度变化略大于前轴承.

结合该加工中心主轴结构图(见图 2)和主轴中部前、中、后温升对比曲线图(见图 12),可看出主轴前后端轴承位置的温升较大,说明此处是热敏感区. 通过图 9 ~ 图 11 可以看出:测点 SP04 ~ SP09 与测点 SP01 ~ SP03 相比来说温升略小,这与测量距离及测点表面热辐射的方向等方面有一定关系. 因此测点 SP01 ~ SP03 可作为进一步热误差补偿的热关键点.

3.5 主轴热变形分析

达到热平衡时的热变形测试结果如表 4 所示. 主轴的热变形图(见图 13 ~ 图 15)与

主轴温升图(见图 9 ~ 图 12)有直接关系,轴向热变形图与温升图随时间变化的趋势基本相同,可以得出主轴热变形的主要原因是温升. 当主轴达到热平衡时,X 和 Y 方向上远端比近端热变形略大,Z 向热变形值远大于 X、Y 方向,Z 向最大热伸长达到 30 μm,会严重影响加工中心的加工精度.

表 4 热平衡时热变形测试结果

| Table 4 The results of thermal deformation testing spindle at a thermal equilibrium | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|
| 热变形 方向 | 线位移/mm | | 差值/ mm |
| | 近端(X2,Y2) | 远端(X1,Y1) | |
| X 向变形 | 0.000 6 | 0.001 2 | 0.000 6 |
| Y 向变形 | 0.001 0 | 0.034 0 | 0.002 4 |
| Z 方向主轴伸长 | 0.030 0 | — | — |

结合热变形实验数据得出:主轴温升过程中,前后轴承位置存在温升差(主轴表面最大温差 5 ℃左右),而会导致主轴箱前后

位置因温升不同带来变形不同;因后轴承发热略大,主轴前端和主轴头固定,因此主轴向上的抬头现象不明显。综上,主轴热变形除轴向伸长外其他方向的热变形数值不大,因此控制轴向(Z向)伸长热变形能较为有效的提高加工精度。

4 结 论

(1)在主轴温度场检测实验方案中,采用红外热像仪获取整个主轴动态的温度数据图像,进而选择了合适的测温点数量与布置位置,最终确定了9个热关键点,避免了冗余传感器间相互耦合干扰,提高了检测的灵敏度。

(2)通过搭建的适合于TX1600G复合式镗铣加工中心主轴系统热误差试验平台采集温度数据,将主轴前轴承、中部和后轴承的9个热关键点温升数据作对比;对比结果表明主轴后端相对前端和中部来看温升较大。分别对比各个测点得到点SP01~SP03温升最明显,说明点SP01~SP03是主要热敏感点,可以作为热误差补偿的温度数据。

(3)在主轴转速为3 000 r/min工况下,根据实验结果得出:达到热平衡时Z向最大热伸长达30 μm ,同转速下X、Y向的热误差值相对较小;且轴向热变形曲线与温升曲线的趋势基本相同,说明主轴热变形主要由温升引起。因此加工中心主轴在实际运行中的误差主要是温升引起的轴向热伸长误差,改善轴向伸长热变形能有效地提高加工精度。

参考文献

[1] LI Z, YANG J, FAN K, et al. Integrated geometric and thermal error modeling and compensation for vertical machining centers[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015, 76(5-8): 1139-1150.

[2] WANG L, WANG H, LI T, et al. A hybrid thermal error modeling method of heavy machine tools in z-axis[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2015,

80(1-4): 389-400.

- [3] LI Y, ZHAO W, LAN S, et al. A review on spindle thermal error compensation in machine tools[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2015, 95: 20-38.
- [4] 郭云霞, 叶文华, 梁睿君, 等. 智能机床的误差补偿技术[J]. 航空制造技术, 2016, 513(18): 40-45.
- (GUO Yunxia, YE Wenhua, LIANG Ruijun, et al. Intelligent machine tool error compensation technology [J]. Aviation manufacturing technology, 2016, 513(18): 40-45.)
- [5] TUREK P, JEDRZEJEWSKI J, MODRZYCKI W. Methods of machine tool error compensation [J]. Journal of machine engineering, 2010, 10(4): 5-25.
- [6] KIM D H, SONG J Y. Development of thermal deformation compensation device and CNC based real-time compensation for advanced manufacturing[J]. International journal of automotive technology, 2013, 14(3): 423-428.
- [7] ABDULSHAHED A M, LONGSTAFF A P, FLETCHER S, et al. Thermal error modelling of machine tools based on ANFIS with fuzzy c-means clustering using a thermal imaging camera[J]. Applied mathematical modelling, 2015, 39(7): 1837-1852.
- [8] 谢黎明, 刘征文, 靳岚, 等. 整机热变形中测温点优化选择方法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(2): 61-63.
- (XIE Liming, LIU Zhengwen, JIN Lan, et al. Research on optimization selecting of temperature measurement points in compound machining center thermal deformation [J]. Combined machine tools and automated processing technology, 2013(2): 61-63.)
- [9] LIU Q, YAN J, PHAM D T, et al. Identification and optimal selection of temperature-sensitive measuring points of thermal error compensation on a heavy-duty machine tool[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 85(1-4): 345-353.
- [10] 肖曙红, 郭军, 张伯霖. 高速电主轴热结构耦合特性的有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2008, 9: 96-98.
- (XIAO Shuhong, GUO Jun, ZHANG Bolin. Finite element analysis of thermostatic coupling characteristics of high-speed electric spindle [J]. Mechanical design and manufacture, 2008, 9: 96-98.)
- [11] DU Z C, YAO S Y, YANG J G. Thermal behavior analysis and thermal error compensation

- for motorized spindle of machine tools[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2015, 16(7): 1571 – 1581.
- [12] FANG B, GU T, YE D, et al. An improved thermo-mechanical model for vertical machining center[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 87(9 – 12): 2581 – 2592.
- [13] 王大伟,刘永红. 基于有限元法的滚珠丝杠传动过程中的温度场和热变形仿真[J]. 计算机辅助工程, 2009, 18(2): 29 – 33.
(WANG Dawei, LIU Yonghong. Simulation of temperature field and thermal deformation in ball screw drive process based on finite element method [J]. Computer assisted engineering, 2009, 18(2): 29 – 33.)
- [14] 杨建国,邓卫国,任永强,等. 机床热补偿中温度变量分组优化建模[J]. 中国机械工程, 2004(6): 10 – 13.
(YANG Jianguo, DENG Weiguo, REN Yongqiang et al. Optimization of temperature variable grouping in machine tool thermal compensation [J]. China mechanical engineering, 2004(6): 10 – 13.)
- [15] 杨昌祥,王立坚,何川,等. 基于热模态分析的主轴热误差鲁棒性建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 90 – 93.
(YANG Changxiang, WANG Lijian, HE Chuan, et al. Robust modeling of thermal error of spindle based on thermal modal analysis [J]. Combined machine tool and automation processing technology, 2015(2): 90 – 93.)
- [16] 郭丰,刘康,王江,等. 数控机床热误差补偿实验平台的设计[J]. 机械工程师, 2016(9): 6 – 8.
(GUO Feng, LIU Kang, WANG Jiang, et al. Design of thermal error compensation experiment platform for CNC [J]. Mechanical engineer, 2016(9): 6 – 8.)
- [17] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J, UHLMANN E, et al. Thermal issues in machine tools [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2012, 61(2): 771 – 791.
- [18] 张苗苗,钱炜. 基于模糊聚类法和互信息法的测温点优化方法[J]. 电子科技, 2017, 30(3): 33 – 36.
(ZHANG Miaomiao, QIAN Wei. Investigation on optimization of temperature measurement key points based on fuzzy clustering analysis and mutual [J]. Electronic science and technology, 2017, 30(3): 33 – 36.)
- [19] HOLKUP T, CAO H, KOLÁŘ P, et al. Thermo-mechanical model of spindles [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2010, 59(1): 365 – 368.
- [20] 吴文嘉,王军,张辉杰,等. 基于小波神经网络的主轴热误差预测研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(8): 93 – 96.
(WU Wenjia, WANG Jun, ZHANG Huijie, et al. Spindle thermal error prediction based on wavelet neural network [J]. Combined machine tool and automation processing technology, 2015(8): 93 – 96.)
- [21] 李旸,位文明,赵万华,等. 精密卧式加工中心主轴轴向热误差补偿方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(8): 9 – 13.
(LI Yang, WEI Wenming, ZHAO Wanhua, et al. Axial thermal error compensation method for the spindle of the precision horizontal machining center [J]. Combined machine tool and automation processing technology, 2012(8): 9 – 13.)
- [22] 仇健,刘启伟,刘春时,等. 卧式加工中心主轴温度场预测与热误差分布[J]. 制造技术与机床, 2012(8): 77 – 79.
(QIU Jian, LIU Qiwei, LIU Chunshi, et al. Forecast of horizontal machining center spindle thermal field and thermal errors distribution [J]. Manufacturing technology & machine tool, 2012(8): 77 – 79.)
- [23] 邓小雷. 数控机床主轴系统多物理场耦合热态特性分析研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
(DENG Xiaolei. Research on analysis of multi-field coupling thermal characteristics for CNC machine tool spindle system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)
- [24] 王传洋,姜宁,邱德义,等. 镗铣加工中心主轴箱热特性仿真及试验研究[J]. 机械设计与制造, 2017(7): 194 – 197.
(WANG Chuanyang, JIANG Ning, QIU Deyi, et al. Simulation and experiment study on thermal characteristic of boring and milling machining center spindle box [J]. Machinery design & manufacture, 2017(7): 194 – 197.)