

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 8 月 6 日 (06.08.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/155228 A1

- (51) 国际专利分类号:
G05B 19/404 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/075712
- (22) 国际申请日: 2019 年 2 月 21 日 (21.02.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910099608.7 2019 年 1 月 31 日 (31.01.2019) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学 (**DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 刘阔(**LIU, Kuo**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 秦波(**QIN, Bo**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 李旭(**LI, Xu**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

(CN)。 甘涌泉(**GAN, Yongquan**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 韩伟(**HAN, Wei**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 黄任杰(**HUANG, Renjie**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。 王永青(**WANG, Yongqing**); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学专利中心, Liaoning 116024 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(54) **Title:** SPINDLE THERMAL ERROR COMPENSATION METHOD INSENSITIVE TO DISTURBANCE OF COOLING SYSTEM

(54) 发明名称: 一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法

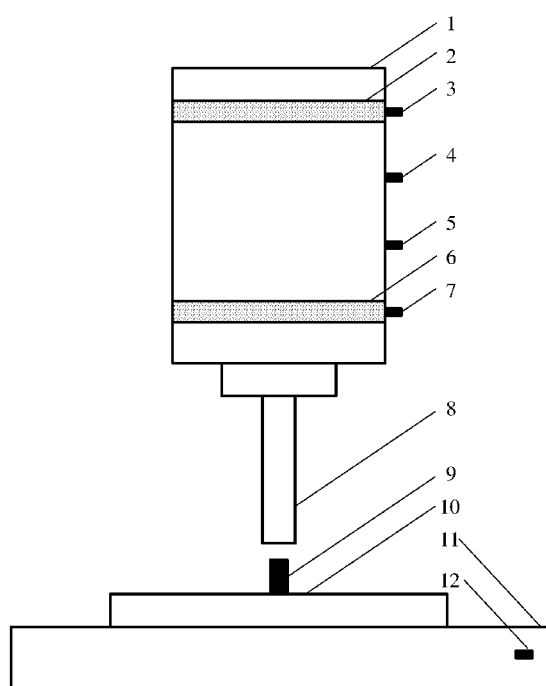


图 1

(57) **Abstract:** A spindle thermal error compensation method insensitive to disturbance of a cooling system. The method comprises: firstly, performing a spindle model coefficient identification test based on a multi-state variable rotational speed; secondly, determining a temperature measuring point having a significant correlation degree with an axial thermal error of a spindle on the basis of a correlation analysis of the temperature and thermal error; thirdly, building a spindle thermal error model which is insensitive to the disturbance of the cooling system, and performing identification under a constraint condition on coefficients in the model on the basis of a non-linear quadratic programming algorithm; and finally, writing a compensation value calculated by the model into a numerical-controlled system on the basis of an OPC UA communication protocol to implement compensation of the thermal error of the spindle. The method has the advantages of high model prediction accuracy and high robustness, and can still keep a good compensation effect especially in the case of frequent start-up of the cooling system and other disturbances.

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法。首先, 进行基于多状态变转速的主轴模型系数辨识试验; 之后, 基于温度与热误差的相关性分析, 确定与主轴轴向热误差关联度显著的温度测点; 接着, 建立对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差模型, 并基于非线性二次规划算法对模型中的系数进行有约束条件下的辨识; 最后, 基于OPC UA通讯协议将模型计算出的补偿值写入到数控系统中, 实现主轴热误差的补偿。该方法的优点为, 模型预测精度高且鲁棒性强, 尤其在冷却系统频繁启动等扰动情况下仍能保持良好的补偿效果。

一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法

技术领域

本发明属于数控机床误差补偿技术领域，具体为一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法。

背景技术

在机床运行过程中，机床内部的诸多热源（如轴承和电机等）都会产生热量。这些热量传递到机床的各个部件上就会引起机床的热变形，从而产生热误差。这不仅影响单个工件的加工精度，还影响批量加工的精度一致性。在精密加工中，机床热误差已经成为影响加工精度的主要因素。为了减小热误差对加工精度的影响，机床开机后先要进行一定时间的空运转热机，这样不仅浪费能源，还降低了加工效率。

目前减小机床热误差的方法主要有两种：（1）热误差防止法，如采用隔热材料，热对称结构设计，选择摩擦系数小的运动部件等。这些方法成本较高。（2）热误差补偿法，通过建立热误差预测模型，对机床运行过程中的热误差进行预测，从而进行补偿。这种方法相对成本低，实时方便，但是难点在于模型的预测精度与鲁棒性。

热误差补偿也分为两种方式：（1）无传感器方式，即不需要外置温度传感器，仅通过读取数控系统中的转速、位置等信息进行热误差预测；（2）有传感器方式，需要在关键位置布置温度传感器，基于温度等信息进行热误差预测。

采用无传感器方式进行热误差补偿虽然成本低，但预测鲁棒性差，对工况稳定性要求高。另外，虽然目前有传感器的热误差补偿方式对转速变化等的鲁棒性较高，但在遇到较大扰动（如冷却系统启停）等情况下，补偿效果就会变差。

发明内容

本发明针对现有主轴热误差补偿方法对冷热扰动鲁棒性不强的问题，提供一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法，使主轴热误差的补偿精度更高、鲁棒性更强，更适于实际加工环境。

本发明的技术方案：

一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法，步骤如下：

首先，进行基于多状态变转速的主轴模型系数辨识试验；之后，基于温度与热误差的相关性分析，确定与主轴轴向热误差关联度显著的温度测点；接着，建立对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差模型，并基于非线性二次规划算法对模型中的系数进行有约束条件下的辨识；最后，基于 OPC UA 通讯协议将模型计算出的补偿值写入到数控系统中，实现主轴热误差的补偿；具体步骤如下：

第一步，主轴热误差模型系数辨识试验

将四个温度传感器布置在主轴 1 的表面，具体位置为：第一温度传感器 3 和第四温度传感器 7 分别布置在后轴承 2 和前轴承 6 位置；第二温度传感器 4 和第三温度传感器 5 均匀分布在后轴承 2 和前轴承 6 之间，其中第二温度传感器 4 靠近后轴承 2，第三温度传感器 5 靠近前轴承 6；检棒 8 通过刀柄接口装卡在主轴上；位移传感器 9 通过磁力表座固定在工作台 10 上；第五温度传感器 12 布置在床身 11 上；

主轴以任意的变转速方式运行，运行过程包含转速上升、转速下降以及启停等多个状态；在此过程中同步记录第一温度传感器 3、第二温度传感器 4、第三温度传感器 5、第四温度传感器 7、第五温度传感器 12 和位移传感器 9 的测量值；

第二步，主轴温度测点确定

对采集的各位置温度数据与主轴热误差做相关性分析，各点温度与主轴热误差的相关系数按如下计算：

$$\rho_{T_j, E_z} = \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) E_z(i) - \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) \sum_{i=1}^m E_z(i)}{m}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m T_j^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m T_j(i))^2}{m})(\sum_{i=1}^m E_z^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m E_z(i))^2}{m})}} \quad (1)$$

式中： ρ_{T_j, E_z} 为第 j 个温度传感器测量值与主轴热误差的相关系数， $T_j(i)$ 为第 j 个温度传感器在时刻 i 测得的温度值， $E_z(i)$ 为位移传感器 9 在时刻 i 测得的主轴热误差值， m 为位移传感器 9 测量的数据数量；

在主轴上的四个温度传感器中，确定与主轴热误差相关系数最大的作为主轴温度测点，设其温度测量值为主轴温度 T_{sp} ；

第三步，主轴热误差模型建立

设第五温度传感器 12 测得的温度值为 T_e ，主轴温度与其差值 T_{sp-e} 的计算公式如下：

$$T_{sp-e}(i) = (T_{sp}(i) - T_{sp}(1)) - (T_e(i) - T_e(1)) \quad (2)$$

式中， $T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp} 与 T_e 在时刻 i 的差值， $T_{sp}(i)$ 为主轴温度测点在时刻 i 的测量值， $T_e(i)$ 为第五温度传感器 12 在时刻 i 的测量值；

T_{sp-e} 的变化量 ΔT_{sp-e} 计算公式如下：

$$\Delta T_{sp-e}(i) = T_{sp-e}(i) - T_{sp-e}(i-1) \quad (3)$$

式中， $\Delta T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp-e} 在时刻 i 的变化量；

主轴热误差模型如下：

$$E_{ez}(i) = (1 - \theta_1) \times E_{ez}(i-1) + \theta_3 \times \theta_1 \times (\Delta T_{sp-e}(i-1) + \frac{\Delta T_{sp-e}(i) - \Delta T_{sp-e}(i-1)}{\theta_2}) \quad (4)$$

式中， $E_{ez}(i)$ 为在时刻 i 主轴热误差计算值， θ_1 、 θ_2 和 θ_3 为系数；

第四步，模型系数辨识

基于非线性二次规划算法对上述热误差模型中的系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 进行有约束条件下的辨识，目标函数 $F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 如下式所示：

$$\begin{aligned} \min[F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)] &= \min\left[\sum_{i=1}^m (E_z(i) - E_{ez}(i))\right] \\ \theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max} \\ \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max} \\ \theta_{3\min} &\leq \theta_3 \leq \theta_{3\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\theta_{1\min}$ 、 $\theta_{2\min}$ 和 $\theta_{3\min}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件下限， $\theta_{1\max}$ 、 $\theta_{2\max}$ 和 $\theta_{3\max}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件上限；

第五步，基于 OPC UA 的热误差补偿

主轴热误差模型在补偿器中运行，补偿器基于 OPC UA 通讯协议将模型计算出的补偿值发送给数控系统，数控系统根据该补偿值实现主轴热误差的补偿。

本发明的有益效果：本发明的主轴热误差模型系数辨识试验采用多状态变转速，可获取更丰富的主轴热特性信息，更贴近实际工况；该模型预测精度高且鲁棒性强，尤其在冷却系统频繁启动等扰动情况下仍能保持良好的补偿效果。对主轴热误差进行补偿，可提高机床加工精度及精度稳定性；省去机床开机后的热机过程，减少能源浪费，并提高加工效率；将环境温度引入到热误差模型中，在非恒温车间也能保证很好的补偿效果，使得精密加工不再需要恒温车间，节约建设成本。

附图说明

图 1 为主轴温度测点布置及热误差测试示意图。

图 2 为主轴热误差补偿流程图。

图 3(a)为补偿前的主轴热误差曲线。

图 3(b)为补偿后的主轴热误差曲线。

图中：1 主轴；2 主轴后轴承；3 第一温度传感器；4 第二温度传感器；5 第三温度传感器；6 主轴后轴承；7 第四温度传感器；8 检棒；9 位移传感器；10 工作台；11 床身；12 第五温度传感器。

具体实施方式

为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清晰明了，下面结合附图对本发明作详细说明。

以某型立式加工中心主轴为例，详细说明本发明的实施方式。该加工中心主轴最高转速 12000r/min。主轴带有水冷装置。

第一步，主轴热误差模型参数辨识试验

将四个温度传感器布置在主轴 1 的表面，具体位置为：第一温度传感器 3 和第四温度传感器 7 分别布置在后轴承 2 和前轴承 6 位置；第二温度传感器 4 和第三温度传感器 5 均匀分布在后轴承 2 和前轴承 6 之间，其中第二温度传感器 4 靠近后轴承 2，第三温度传感器 5 靠近前轴承 6；检棒 8 通过刀柄接口装卡在主轴上；位移传感器 9 通过磁力表座固定在工作台 10 上；第五温度传感器 12 布置在床身 11 上；

让主轴按下表所示顺序运行：

表 1 主轴运行顺序表

序号	主轴转速/（r/min）	运行时间/min
1	1000	30
2	4000	20
3	6000	10
4	8000	30
5	2000	60

6	0	120
7	4000	70
8	10000	60
9	0	20

在主轴运行过程中同步记录第一温度传感器 3、第二温度传感器 4、第三温度传感器 5、第四温度传感器 7、第五温度传感器 12 和位移传感器 9 的测量值。

第二步，主轴温度测点确定

对采集的各位置温度数据与主轴热误差做相关性分析，各点温度与主轴热误差的相关系数按如下计算：

$$\rho_{T_j, E_z} = \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) E_z(i) - \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) \sum_{i=1}^m E_z(i)}{m}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m T_j^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m T_j(i))^2}{m})(\sum_{i=1}^m E_z^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m E_z(i))^2}{m})}} \quad (1)$$

式中 ρ_{T_j, E_z} 为第 j 个温度传感器测量值与主轴热误差的相关系数， $T_j(i)$ 为第 j 个温度传感器在时刻 i 测得的温度值， $E_z(i)$ 为位移传感器 9 在时刻 i 测得的主轴热误差值， m 为位移传感器 9 测量的数据数量。

按式 (1) 分别计算温度传感器 3、4、6 和 7 的测量值与位移传感器 9 的测量值之间的相关系数。具体结果如下表所示。

表 2 主轴各温度与热误差的相关系数

温度传感器	相关系数
第一温度传感器 3	0.9145
第二温度传感器 4	0.9546
第三温度传感器 6	0.9039

第四温度传感器 7

0.7880

选择与热误差相关系数最大的第二温度传感器 4 作为主轴温度测点，设其温度测量值为主轴温度 T_{sp} 。

第三步，主轴热误差模型建立

设第五温度传感器 12 测得的温度值为 T_e ，主轴温度与其差值 T_{sp-e} 的计算公式如下：

$$T_{sp-e}(i) = (T_{sp}(i) - T_{sp}(1)) - (T_e(i) - T_e(1)) \quad (2)$$

式中， $T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp} 与 T_e 在时刻 i 的差值， $T_{sp}(i)$ 为主轴温度测点在时刻 i 的测量值， $T_e(i)$ 为第五温度传感器 12 在时刻 i 的测量值。

T_{sp-e} 的变化量 ΔT_{sp-e} 计算公式如下：

$$\Delta T_{sp-e}(i) = T_{sp-e}(i) - T_{sp-e}(i-1) \quad (3)$$

式中， $\Delta T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp-e} 在时刻 i 的变化量。

主轴热误差模型公式如下：

$$E_{ez}(i) = (1 - \theta_1) \times E_{ez}(i-1) + \theta_3 \times \theta_1 \times (\Delta T_{sp-e}(i-1) + \frac{\Delta T_{sp-e}(i) - \Delta T_{sp-e}(i-1)}{\theta_2}) \quad (4)$$

式中， $E_{ez}(i)$ 为在时刻 i 主轴热误差计算值， θ_1 、 θ_2 和 θ_3 为系数。

第四步，模型系数辨识

基于非线性二次规划算法对上述热误差模型中的系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 进行有约束条件下的辨识，目标函数 $F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 如下式所示。

$$\begin{aligned} \min[F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)] &= \min\left[\sum_{i=1}^m (E_z(i) - E_{ez}(i))\right] \\ \theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max} \\ \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max} \\ \theta_{3\min} &\leq \theta_3 \leq \theta_{3\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\theta_{1\min}$ 、 $\theta_{2\min}$ 和 $\theta_{3\min}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件下限， $\theta_{1\max}$ 、 $\theta_{2\max}$

和 $\theta_{3\max}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件上限。

根据式(2)~(4)建立主轴热误差模型。根据式(5)对模型中的参数进行辨识,辨识结果为: $\theta_1=7.5\times 10^{-5}$, $\theta_2=9.8\times 10^{-3}$, $\theta_3=408.1\mu\text{ m}/^\circ\text{C}$ 。

第五步,基于 OPC UA 的热误差补偿

主轴热误差模型在补偿器中运行,补偿器基于 OPC UA 通讯协议将模型计算出的补偿值发送给数控系统。数控系统根据该补偿值实现主轴热误差的补偿。补偿流程如图 2 所示。

图 3(a)和图 3(b)为按上述步骤得到的立式加工中心主轴热误差补偿前后的对比结果。其中图 3(a)为补偿前主轴热误差曲线,图 3(b)为补偿后主轴热误差曲线。

权利要求书

1.一种对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差补偿方法，首先，进行基于多状态变转速的主轴模型系数辨识试验；之后，基于温度与热误差的相关性分析，确定与主轴轴向热误差关联度显著的温度测点；接着，建立对冷却系统扰动不敏感的主轴热误差模型，并基于非线性二次规划算法对模型中的系数进行有约束条件下的辨识；最后，基于 OPC UA 通讯协议将模型计算出的补偿值写入到数控系统中，实现主轴热误差的补偿；其特征在于，步骤如下：

第一步，主轴热误差模型系数辨识试验

将四个温度传感器布置在主轴（1）的表面，具体位置为：第一温度传感器（3）和第四温度传感器（7）分别布置在后轴承（2）和前轴承（6）位置；第二温度传感器（4）和第三温度传感器（5）均匀分布在后轴承（2）和前轴承（6）之间，其中第二温度传感器（4）靠近后轴承（2），第三温度传感器（5）靠近前轴承（6）；检棒（8）通过刀柄接口装卡在主轴上；位移传感器（9）通过磁力表座固定在工作台（10）上；第五温度传感器（12）布置在床身（11）上；

主轴以任意的变转速方式运行，运行过程包含转速上升、转速下降以及启停等多个状态；在此过程中同步记录第一温度传感器（3）、第二温度传感器（4）、第三温度传感器（5）、第四温度传感器（7）、第五温度传感器（12）和位移传感器（9）的测量值；

第二步，主轴温度测点确定

对采集的各位置温度数据与主轴热误差做相关性分析，各点温度与主轴热误差的相关系数按如下计算：

$$\rho_{T_j, E_z} = \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) E_z(i) - \frac{\sum_{i=1}^m T_j(i) \sum_{i=1}^m E_z(i)}{m}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m T_j^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m T_j(i))^2}{m})(\sum_{i=1}^m E_z^2(i) - \frac{(\sum_{i=1}^m E_z(i))^2}{m})}} \quad (1)$$

式中： ρ_{T_j, E_z} 为第 j 个温度传感器测量值与主轴热误差的相关系数， $T_j(i)$ 为第 j 个温度传感器在时刻 i 测得的温度值， $E_z(i)$ 为位移传感器（9）在时刻 i 测得的主轴热误差值， m 为位移传感器（9）测量的数据数量；

在主轴上的四个温度传感器中，确定与主轴热误差相关系数最大的作为主轴温度测点，设其温度测量值为主轴温度 T_{sp} ；

第三步，主轴热误差模型建立

设第五温度传感器（12）测得的温度值为 T_e ，主轴温度与其差值 T_{sp-e} 的计算公式如下：

$$T_{sp-e}(i) = (T_{sp}(i) - T_{sp}(1)) - (T_e(i) - T_e(1)) \quad (2)$$

式中， $T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp} 与 T_e 在时刻 i 的差值， $T_{sp}(i)$ 为主轴温度测点在时刻 i 的测量值， $T_e(i)$ 为第五温度传感器（12）在时刻 i 的测量值；

T_{sp-e} 的变化量 ΔT_{sp-e} 计算公式如下：

$$\Delta T_{sp-e}(i) = T_{sp-e}(i) - T_{sp-e}(i-1) \quad (3)$$

式中， $\Delta T_{sp-e}(i)$ 为 T_{sp-e} 在时刻 i 的变化量；

主轴热误差模型如下：

$$E_{ez}(i) = (1 - \theta_1) \times E_{ez}(i-1) + \theta_3 \times \theta_1 \times (\Delta T_{sp-e}(i-1) + \frac{\Delta T_{sp-e}(i) - \Delta T_{sp-e}(i-1)}{\theta_2}) \quad (4)$$

式中， $E_{ez}(i)$ 为在时刻 i 主轴热误差计算值， θ_1 、 θ_2 和 θ_3 为系数；

第四步，模型系数辨识

基于非线性二次规划算法对上述热误差模型中的系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 进行有约束

条件下的辨识，目标函数 $F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 如下式所示：

$$\begin{aligned} \min[F(\theta_1, \theta_2, \theta_3)] &= \min\left[\sum_{i=1}^m (E_z(i) - E_{ez}(i))\right] \\ \theta_{1\min} &\leq \theta_1 \leq \theta_{1\max} \\ \theta_{2\min} &\leq \theta_2 \leq \theta_{2\max} \\ \theta_{3\min} &\leq \theta_3 \leq \theta_{3\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $\theta_{1\min}$ 、 $\theta_{2\min}$ 和 $\theta_{3\min}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件下限， $\theta_{1\max}$ 、 $\theta_{2\max}$ 和 $\theta_{3\max}$ 分别为系数 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 的约束条件上限；

第五步，基于 OPC UA 的热误差补偿

主轴热误差模型在补偿器中运行，补偿器基于 OPC UA 通讯协议将模型计算出的补偿值发送给数控系统，数控系统根据该补偿值实现主轴热误差的补偿。

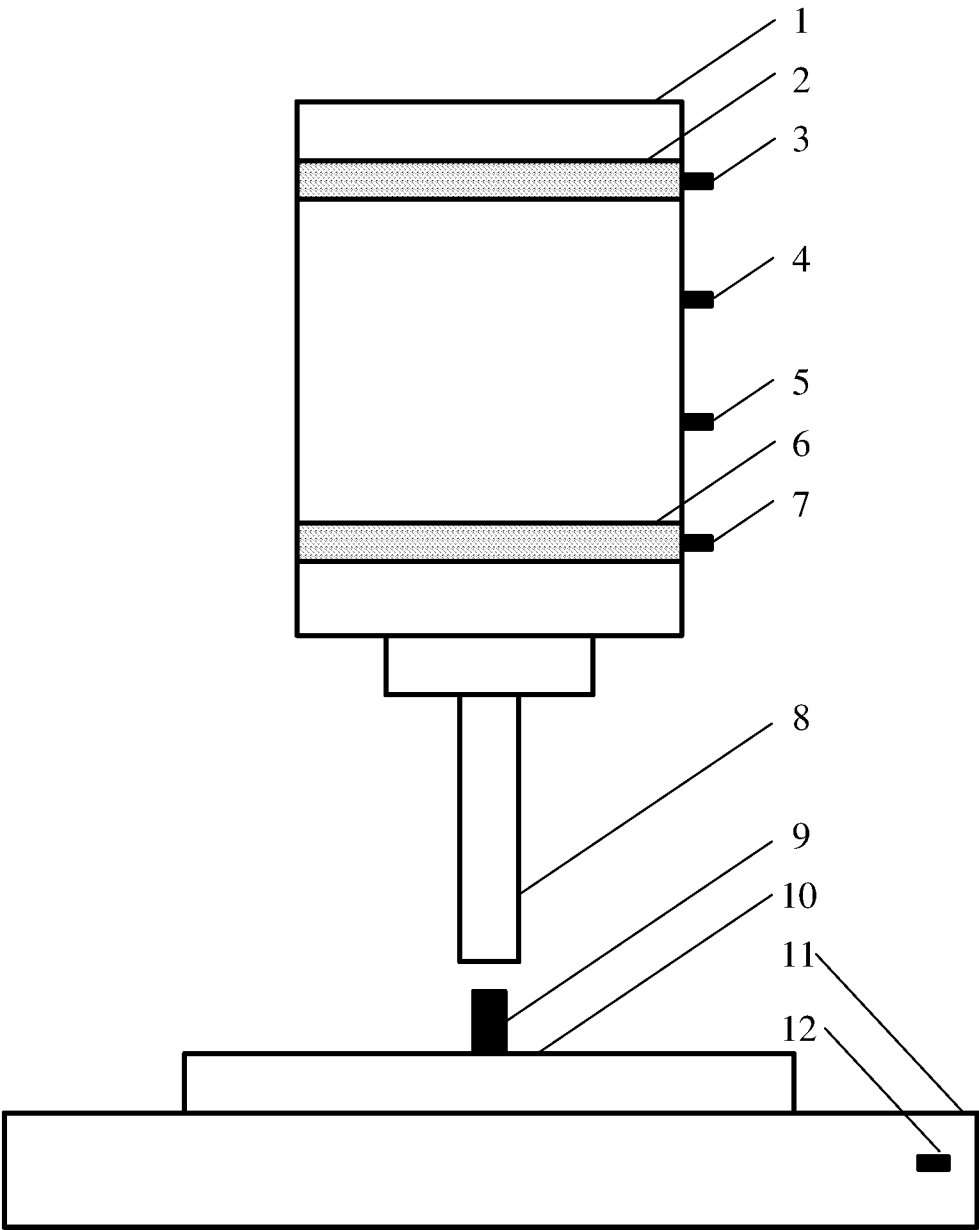


图 1

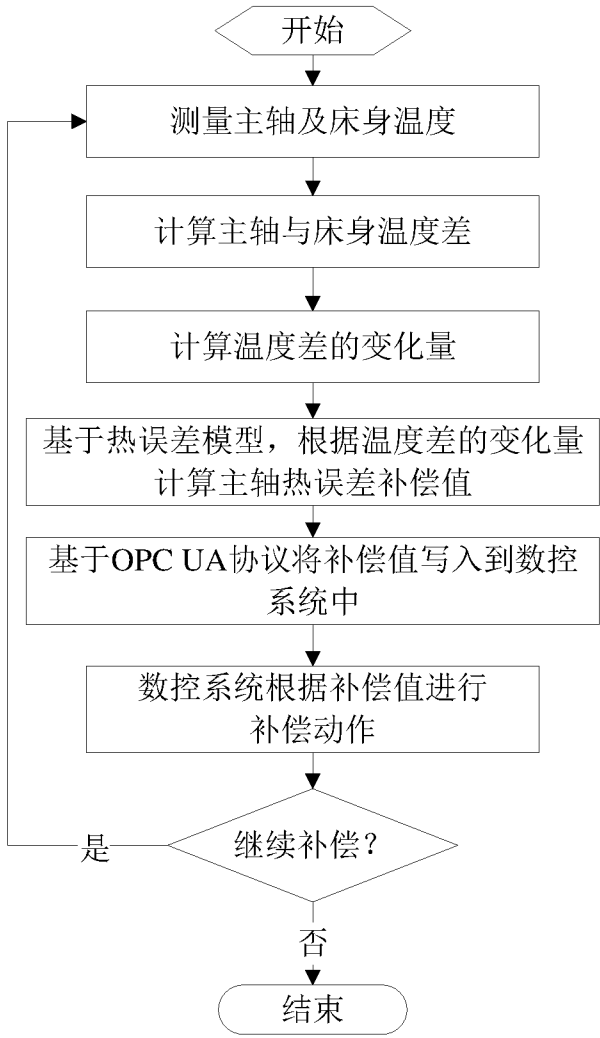


图 2

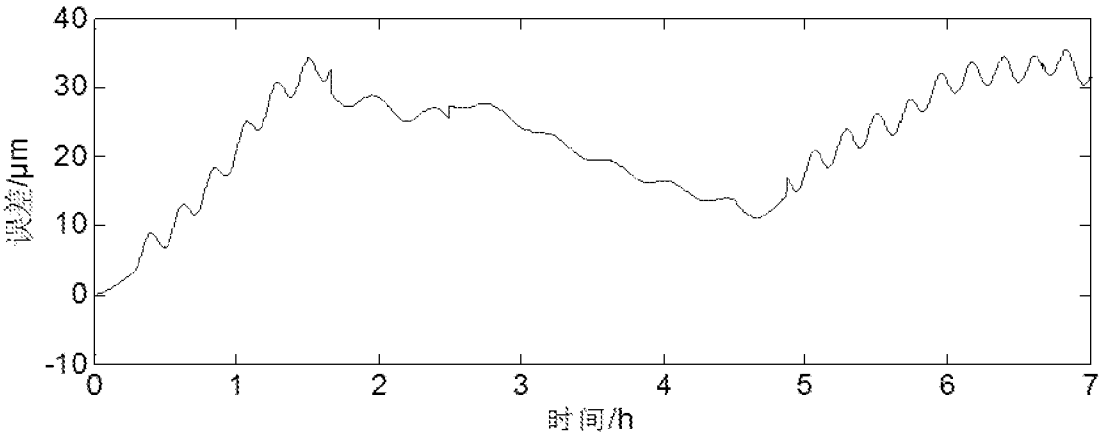


图 3(a)

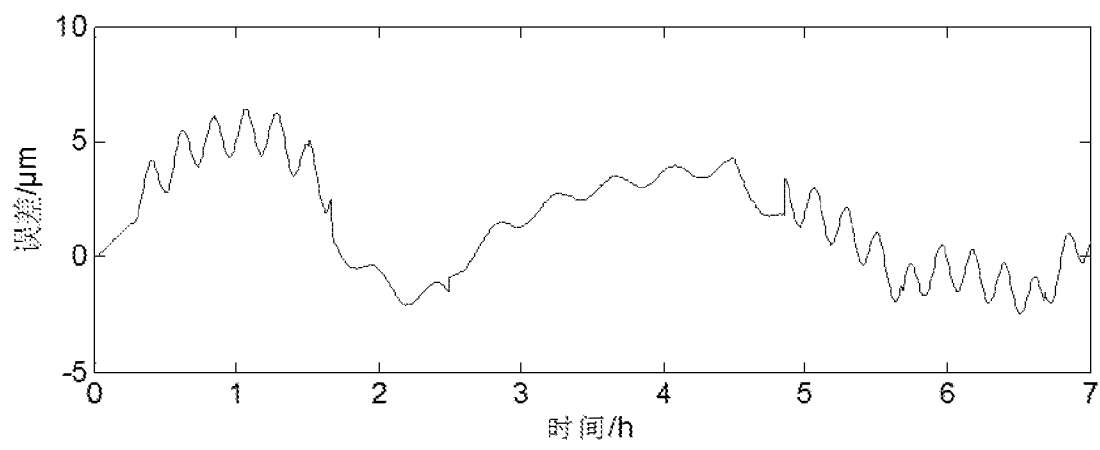


图 3(b)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/075712

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 19/404(2006.01)i; G05B 19/404(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B19

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, VEN, ISI, CNKI, 万方, WANFANG, 百度, BAIDU, 冷却系统, 数控机床, 主轴, 热补偿, 非线性二次规划, 模型, 热误差 Cooling system, CNC machine tool, spindle, thermal compensation, nonlinear quadratic programming, model, thermal error

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106444628 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 22 February 2017 (2017-02-22) entire document	1
A	CN 107918357 A (KEDE NUMERICAL CONTROL CO., LTD.) 17 April 2018 (2018-04-17) entire document	1
A	TW 201037268 A (CARMAR TECHNOLOGY CO., LTD.) 16 October 2010 (2010-10-16) entire document	1
A	US 8255075 B2 (OU FENG-MING et al.) 28 August 2012 (2012-08-28) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

22 October 2019

Date of mailing of the international search report

29 October 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/075712

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106444628	A	22 February 2017	CN	106444628	B	16 October 2018
CN	107918357	A	17 April 2018	None			
TW	201037268	A	16 October 2010	None			
US	8255075	B2	28 August 2012	US	2010152881	A1	17 June 2010
				TW	201021959	A	16 June 2010

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/075712

A. 主题的分类 G05B 19/404(2006.01)i; G05B 19/404(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G05B19 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNABS, VEN, ISI, CNKI, 万方, 百度 冷却系统, 数控机床, 主轴, 热补偿, 非线性二次规划, 模型, 热误差 Cooling system, CNC machine tool, spindle, thermal compensation, nonlinear quadratic programming, model, thermal error																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 106444628 A (大连理工大学) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107918357 A (科德数控股份有限公司) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>TW 201037268 A (CARMAR TECHNOLOGY CO LTD) 2010年 10月 16日 (2010 - 10 - 16) 全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 8255075 B2 (OU FENG-MING等) 2012年 8月 28日 (2012 - 08 - 28) 全文</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 106444628 A (大连理工大学) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文	1	A	CN 107918357 A (科德数控股份有限公司) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17) 全文	1	A	TW 201037268 A (CARMAR TECHNOLOGY CO LTD) 2010年 10月 16日 (2010 - 10 - 16) 全文	1	A	US 8255075 B2 (OU FENG-MING等) 2012年 8月 28日 (2012 - 08 - 28) 全文	1
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	CN 106444628 A (大连理工大学) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 全文	1															
A	CN 107918357 A (科德数控股份有限公司) 2018年 4月 17日 (2018 - 04 - 17) 全文	1															
A	TW 201037268 A (CARMAR TECHNOLOGY CO LTD) 2010年 10月 16日 (2010 - 10 - 16) 全文	1															
A	US 8255075 B2 (OU FENG-MING等) 2012年 8月 28日 (2012 - 08 - 28) 全文	1															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																	
国际检索实际完成的日期 2019年 10月 22日		国际检索报告邮寄日期 2019年 10月 29日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 赵晓宇 电话号码 86-(010)-62084132															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/075712

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	106444628	A	2017年 2月 22日	CN 106444628 B	2018年 10月 16日
CN	107918357	A	2018年 4月 17日	无	
TW	201037268	A	2010年 10月 16日	无	
US	8255075	B2	2012年 8月 28日	US 2010152881 A1	2010年 6月 17日
				TW 201021959 A	2010年 6月 16日