

# (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 2020/155229 A1**

(51) 国际专利分类号:  
**G05B 19/404** (2006.01) **B23Q 15/18** (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/075714

(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:  
201910099610.4 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)。 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)。 吴嘉锐(WU, Jiakun); 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)。 刘海宁(LIU, Haining); 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)。 沈明瑞(SHEN, Mingrui); 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)。 刘海波(LIU, Haibo); 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)。

(54) Title: METHOD FOR SELF-ADAPTIVE COMPENSATION FOR FEED SHAFT THERMAL ERROR

(54) 发明名称: 一种进给轴热误差自适应补偿方法

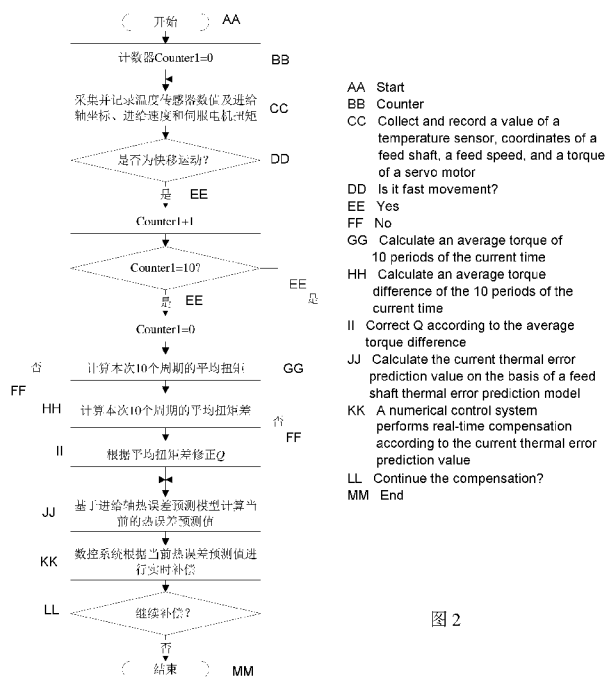


图 2

(57) Abstract: A method for self-adaptive compensation for a feed shaft thermal error, relating to the field of error compensation for a numerically controlled machine tool. The method comprises: first performing a feed shaft thermal error test on the basis of a laser interferometer and a temperature sensor (11); then establishing a thermal error prediction model on the basis of a feed shaft thermal error mechanism, and identifying a thermal characteristic parameter in the model according to the thermal error test data; then performing a self-adaptive thermal error prediction model parameter identification test in different pretension states of a bolt (8); then establishing a

(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。

(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))。

self-adaptive prediction model on the basis of a feed shaft thermal error prediction model and identifying a parameter in the prediction model; and finally performing self-adaptive compensation for a thermal error on the basis of a feed shaft thermal error self-adaptive prediction model. The method can self-adaptively adjust the thermal characteristic parameter in the thermal error prediction model according to the current state of the machine tool to implement self-adaptive real-time compensation, such that the machine tool can still maintain good machining precision and precision stability after long-term abrasion during use under different working conditions.

(57) 摘要: 一种进给轴热误差自适应补偿方法, 属于数控机床误差补偿领域, 首先基于激光干涉仪和温度传感器 (11) 进行进给轴热误差测试; 接着基于进给轴热误差机理, 建立热误差预测模型, 并根据热误差测试数据对模型中热特性参数进行辨识; 之后在不同螺母 (8) 预紧状态下, 进行自适应热误差预测模型参数辨识测试; 接着在进给轴热误差预测模型基础上建立自适应预测模型, 并对该测模型中的参数进行辨识; 最后基于进给轴热误差自适应预测模型进行热误差的自适应补偿。该方法可根据机床当前状态自适应调整热误差预测模型中的热特性参数, 实现了自适应实时补偿, 使机床在各种工况下以及长期使用磨损后仍能保持较好的加工精度和精度稳定性。

## 一种进给轴热误差自适应补偿方法

### 技术领域

本发明属于数控机床误差补偿技术领域，具体为一种进给轴热误差自适应补偿方法。

### 背景技术

采用螺母丝杠副传动方式的机床进给轴，在运行过程中螺母与丝杠摩擦会产生摩擦热，这些热量传递到丝杠上就会引起丝杠的热膨胀。当进给轴采用半闭环控制方式时，丝杠的热膨胀就会引起进给轴定位误差的变化，这种变化就是进给轴热误差。进给轴热误差不仅会造成单件工件加工超差，还会造成批量加工时精度一致性变差。目前减小进给轴热误差对加工精度影响的方法主要有两种：

(1) 批量加工时，提高工件精度测量的频率和人工修改刀补的频率。该方式仅适合某些加工过程刀具运行轨迹简单的情况，如棒料的外圆车削加工。若刀具运动轨迹复杂，该方法则难以应用。另外，该方法降低了加工效率，提高了操作强度。

(2) 热误差补偿法。该方法通过预测模型进行实时补偿，不需要人工干预，不影响机床的加工过程。在专利《半闭环进给轴的热膨胀误差建模及补偿方法》（申请号：CN201710310577.6）中基于螺母和丝杠的摩擦生热、热传导和热对流机理的分析，建立了丝杠在螺母副时变动态热源激励下的温度场预测模型。

该进给轴热误差补偿方法的缺点为：补偿所用预测模型的参数基于建模时机床的状态辨识得到。但是，机床长期使用磨损后，模型中的某些热特性参数会发生变化，而目前的模型并不能根据这些变化进行自适应调整，从而导致在机床长期使用磨损后补偿效果变差。

## 发明内容

本发明针对目前进给轴热误差补偿方法不能对机床磨损等情况自适应补偿的现状，提出了一种进给轴热误差自适应补偿方法。

本发明的技术方案：

一种进给轴热误差自适应补偿方法，首先，采用激光干涉仪和温度传感器进行进给轴热误差试验；接着，基于传热机理建立热误差预测模型，并根据热误差测试数据对热误差预测模型中热特性参数进行辨识；然后，在螺母不同预紧状态下，进行自适应热误差预测模型参数辨识试验；接着，在进给轴热误差预测模型基础上建立自适应预测模型，并对该自适应预测模型模型中的参数进行辨识；最后，基于自适应预测模型进行进给轴热误差的自适应补偿；

步骤如下：

第一步，进给轴热误差测试

温度传感器（11）布置在丝杠附近床身（9）上；激光干涉仪的激光头（1）通过三脚架布置在机床外部坚实地面上，干涉镜（6）通过磁力表座固定在主轴（5）上，反射镜（10）通过磁力表座固定在工作台（7）上；

进给轴热误差测试过程为：首先在初始热稳态下测试进给轴的全行程定位误差，记录温度传感器（11）数值；然后，进给轴以一定进给速度在一定范围内进行热机运动，直至热平衡；最后，进给轴停止在任意位置进行降温，直至重新达到热平衡；在此过程中每隔一定时间（约 10min）测试一次进给轴全行程定位误差，记录温度传感器（11）数值；

第二步，进给轴热误差预测模型建立

将前轴承（3）至后轴承（12）之间的丝杠细分为  $N$  段，每段长度为  $L$ ；丝杠实时温度场的预测模型为：

$$T_i(t) = \frac{Q - \{h \times S \times [T_i(t - \Delta t) - T_f(t - \Delta t)] + \lambda \times A \frac{[2 \times T_i(t - \Delta t) - T_{i-1}(t - \Delta t) - T_{i+1}(t - \Delta t)]}{L}\} \times \Delta t}{c \times m} + T_i(t - \Delta t) \quad (1)$$

式中,  $T_i(t)$  为第  $i$  段丝杠当前时刻的温度;  $Q$  为螺母经过每段丝杠产生的热量;  $T_i(t - \Delta t)$  为第  $i$  段丝杠前一时刻的温度;  $\lambda$  为热传导系数;  $A$  为丝杠的截面积;  $T_{i-1}(t - \Delta t)$  为第  $i-1$  段丝杠前一时刻的温度;  $T_{i+1}(t - \Delta t)$  为第  $i+1$  段丝杠前一时刻的温度;  $h$  为对流散热系数;  $S$  为每段丝杠与空气的换热面积;  $T_f(t - \Delta t)$  为前一时刻与丝杠表面接触的空气温度;  $c$  为丝杠材料的比热容;  $m$  为每段丝杠的质量;

进给轴在第  $I$  段丝杠位置热误差预测值  $E_s^I(t)$  的计算公式为:

$$E_s^I(t) = \sum_{i=1}^I (T_i(t) - T_0) \times L \times k_{coff} \quad (2)$$

式中,  $T_0$  为丝杠初始温度,  $k_{coff}$  为丝杠的热膨胀系数;

基于参数自动寻优方法, 应用第一步中得到的误差和温度数据, 按照式(3)对式(1)中的  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  热特性参数进行有约束条件下的辨识;

$$\begin{aligned} \min[F(Q, h, \lambda)] &= \min\left[\sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V |E_t(u, v) - E_s(u, v)|\right] \\ Q_{\min} &\leq Q \leq Q_{\max} \\ h_{\min} &\leq h \leq h_{\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda \leq \lambda_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $E_t(u, v)$  表示第  $u$  次热误差测试时第  $v$  个测试点的热膨胀误差测试值,  $E_s(u, v)$  表示第  $u$  次热误差测试时第  $v$  个测试点的热膨胀误差预测值;  $U$  为热误差测试的总次数,  $V$  为进给轴每次测试的点数;  $Q_{\min}$ 、 $h_{\min}$  和  $\lambda_{\min}$  分别为参数  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  的约束条件下限;  $Q_{\max}$ 、 $h_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  分别为参数  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  的约束条件上限;

第三步, 热误差自适应补偿模型中参数辨识试验及数据处理

在螺母正常预紧状态以及其他不同预紧状态下 (例如五种螺母预紧状态: 状态 1 正常预紧; 状态 2 预紧量减小 10%; 状态 3 预紧量减小 20%; 状态 4 预

紧量增加 10%；状态 5 预紧量增加 20%；），进行如下测试及数据处理：

设在  $M$  种螺母预紧状态下进行测试，其中正常预紧状态为状态 1。

(1) 在初始热稳态下，进给轴进行一次全行程快移运动；在运动的匀速段以一定周期同步记录位置及伺服电机的扭矩；

基于位置和扭矩数据，按式 (4) 计算快移运动时的平均扭矩：

$$\bar{M}_j = \frac{1}{K_j} \sum_{k=1}^{K_j} M_j(k) \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中， $\bar{M}_j$  为第  $j$  种螺母预紧状态的平均扭矩； $K_j$  为第  $j$  种螺母预紧状态下采集的扭矩数据个数； $M_j(k)$  为第  $j$  种螺母预紧状态下采集的第  $k$  个扭矩值；

根据式 (5) 计算状态 2 至状态 5 的平均扭矩与状态 1 的平均扭矩之差  $\Delta\bar{M}_j$ ；

$$\Delta\bar{M}_j = \bar{M}_j - \bar{M}_1 \quad j = 2, 3, \dots, M \quad (5)$$

(2) 测试进给轴热机一定时间的热误差和床身温度；基于第二步中的热误差预测模型和辨识出的  $h$  和  $\lambda$  值，根据本组热误差和床身温度数据辨识出第 2 至第 5 种丝杠预紧状态对应的  $Q_j$ ， $j = 2, 3, 4, 5$ ；之后根据式 (6) 计算  $Q_j$  与第二步中辨识出的  $Q$  之差：

$$\Delta Q_j = Q_j - Q \quad j = 2, 3, \dots, M \quad (6)$$

第四步，进给轴热误差自适应预测模型建立

$Q$  的变化量  $\Delta Q$  与平均扭矩差  $\Delta\bar{M}$  的关系模型如式 (7) 所示：

$$\Delta Q = \alpha \times \Delta\bar{M} + \beta \quad (7)$$

式中， $\alpha$  和  $\beta$  为系数；

基于最小二乘法，根据第三步中得到的数据  $\{\Delta Q_j, \bar{M}_j\} (j = 2, 3, \dots, M)$ ，对式 (7) 中的系数  $\alpha$  和  $\beta$  进行辨识；

第五步，进给轴热误差自适应补偿实施

进给轴运行过程中实时采集并记录进给轴的位置、进给速度和伺服电机扭矩；根据进给速度判断是否有连续  $R$  个采样周期的匀速快移运动；若有，则进行如下计算：

(1) 根据式 (8) 计算该  $R$  个周期内的平均扭矩：

$$\bar{M}_s = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R M_s(k) \quad (8)$$

式中， $\bar{M}_s$  为本次  $R$  个周期的平均扭矩， $M_s(k)$  为本次  $R$  个周期中的第  $k$  个扭矩采集值；

(2) 设本次  $R$  个周期进给轴运行的位置区间为  $[P_0, P_1]$ ；在第三步中状态 1 时采集的扭矩数据中，提取位置区间  $[P_0, P_1]$  内的扭矩值  $M_1^p(k), k = 1, 2, \dots, K_1^p$ ；并根据式 (9) 计算  $M_1^p$  的平均值：

$$\bar{M}_1^p = \frac{1}{K_1^p} \sum_{k=1}^{K_1^p} M_1^p(k) \quad (9)$$

(3) 根据式 (10) 计算本次  $R$  个周期的平均扭矩差：

$$\Delta \bar{M}_s = \bar{M}_s - \bar{M}_1^p \quad (10)$$

(4) 根据  $\Delta \bar{M}_s$ ，基于式 (7) 计算出本次的  $\Delta Q_s$ ，根据式 (11) 自适应修正螺母经过每段丝杠产生的热量  $Q_{new}$ ：

$$Q_{new} = Q + \Delta Q_s \quad (11)$$

应用自适应修正后的  $Q_{new}$ ，基于式 (1) 和式 (2) 对进给轴热误差进行自适应预测；数控系统根据该预测值对进给轴进行自适应实时补偿。

本发明的有益效果为：本发明的方法可根据机床当前状态自适应调整热误差预测模型中的热特性参数，实现自适应实时补偿，使机床在长期使用磨损后仍能保持较好的加工精度和精度稳定性。对进给轴热误差进行自适应实时补偿，

减小了进给轴热误差对加工精度及精度一致性的影响。该方法在保证加工精度的前提下，减少了工件测量和人工调整刀补的次数，提高了加工效率，降低了操作强度。

## 附图说明

图 1 为进给轴热误差测试及温度测点布置示意图。

图 2 为进给轴热误差自适应补偿流程图。

图 3 (a) 为使用本专利方法进行补偿后的热误差。

图 3 (b) 为未使用本专利方法进行补偿的热误差。

图中：1 激光头；2 伺服电机；3 前轴承；4 丝杠；5 主轴；6 干涉镜；7 工作台；8 螺母；9 床身；10 反射镜；11 温度传感器；12 后轴承。

## 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 X 轴为例，详细说明本发明的实施方式。

X 轴基本信息为：

- 采用半闭环控制；
- 采用滚珠丝杠副传动；
- 前轴承为固定方式，后轴承为支撑方式，无预拉伸；
- 前后丝杠间的丝杠长度为 900mm；
- 快移速度为 24mm/min。

第一步，进给轴热误差测试

温度传感器 11 布置在丝杠附近床身 9 上。激光干涉仪的激光头 1 通过三脚架布置在机床外部坚实地面上，干涉镜 6 通过磁力表座固定在主轴 5 上，反射镜 10 通过磁力表座固定在工作台 7 上。

进给轴热误差测试过程为：

首先，在初始热稳态下测试进给轴在机械坐标 10mm~710mm 范围内的定位误差，记录温度传感器 11 的数据。接着，进给轴以 8000mm/min 的进给速度，在机械坐标 235mm~485mm 范围内进行热机运动，热机时间 60min；然后，进给轴停止在机械坐标 10mm 位置进行降温，降温时间 40min。在此过程中每隔 10min 测试一次进给轴在机械坐标 10mm~710mm 范围内的定位误差，记录温度传感器 11 的数据。

第二步，进给轴热误差预测模型建立

将前轴承 3 至后轴承 12 之间的丝杠细分为 900 段，每段长度为 10mm。丝杠实时温度场的预测模型如式（1）和式（2）所示。根据式（3）对模型中的参数  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  进行辨识，结果为： $Q=0.86\text{J}$ ， $h=12.28\text{ W}/(\text{m}^2\times^\circ\text{C})$ ， $\lambda=59.4\text{ W}/(\text{m}\times^\circ\text{C})$ 。

第三步，热误差自适应补偿模型中参数辨识试验及数据处理

在五种螺母预紧状态下，分别进行如下测试及数据处理。五种螺母预紧状态为：状态 1：正常预紧；状态 2：预紧量减小 10%；状态 3：预紧量减小 20%；状态 4：预紧量增加 10%；状态 5：预紧量增加 20%。

（1）在初始热稳态下，进给轴进行一次全行程快移运动。在运动的匀速段以 1000Hz 的采样频率同步记录位置及伺服电机扭矩。

基于位置和扭矩数据，根据式（4）计算匀速快移运动时的平均扭矩。根据式（5）计算状态 2 至状态 5 的均扭矩与状态 1 的平均扭矩之差。

（2）进给轴以 8000mm/min 的进给速度，在机械坐标 235mm~485mm 范围内进行热机 20min，测试热机前后机械坐标 10mm~710mm 范围内的定位误差，记录温度传感器 11 的数据。基于第二步中建立的热误差预测模型和辨识出的  $h$  和  $\lambda$ ，根据本组热误差和床身温度数据辨识出第 2 至第 5 种丝杠预紧状态对应的

$Q$ 。

第四步，进给轴热误差自适应预测模型建立

$Q$  的变化量  $\Delta Q$  与平均扭矩差  $\Delta \bar{M}$  的关系模型如式 (7) 所示。基于最小二乘法，根据第三步中得到的数据，对式 (7) 中的系数  $\alpha$  和  $\beta$  进行辨识，结果为： $\alpha=0.76\text{J/Nm}$ ， $\beta=0.01\text{J}$ 。

第五步，进给轴热误差自适应补偿实施

进给轴运行过程中实时采集并记录进给轴的位置、进给速度和伺服电机扭矩。根据进给速度判断是否有连续 10 个采样周期的快移匀速运动。若有则进行如下计算：

(1) 根据式 (8) 计算该 10 个周期内的平均扭矩  $\bar{M}_s$ 。

(2) 设本次 10 个周期进给轴运行的位置区间为  $[P_0, P_1]$ 。在第三步中状态 1 时采集的扭矩数据中，提取位置区间  $[P_0, P_1]$  内的扭矩值  $M_1^p(k), k = 1, 2, \dots, K_1^p$ 。并根据式 (9) 计算  $M_1^p$  的平均值  $\bar{M}_1^p$ 。

(3) 根据式 (10) 计算本次 10 个周期的平均扭矩差  $\Delta \bar{M}_s$ 。

(4) 根据  $\Delta \bar{M}_s$ ，基于式 (7) 计算出本次的  $\Delta Q_s$ ，根据式 (11) 自适应修正螺母经过每段丝杠产生的热量  $Q_{new}$ 。

应用自适应修正后的  $Q_{new}$ ，基于式 (1) 和式 (2) 对进给轴热误差进行自适应预测。基于 FOCAS II 协议，将该预测值发送给 FANUC 0iMD 数控系统，数控系统通过扩展的机械坐标原点偏移功能实现进给轴自适应实时补偿。具体流程如图 2 所示。

图 3 (a) 和图 3 (b) 为按照本专利方法在 X 轴上进行自适应补偿前后对比图。其中图 3 (a) 为使用本专利方法进行补偿后的热误差，图 3 (b) 为未使用本专利方法进行补偿的热误差。

### 权利要求书

1.一种进给轴热误差自适应补偿方法，其特征在于，首先，采用激光干涉仪和温度传感器进行进给轴热误差试验；接着，基于传热机理建立热误差预测模型，并根据热误差测试数据对模型中热特性参数进行辨识；然后，在螺母不同预紧状态下，进行自适应热误差预测模型参数辨识试验；接着，在进给轴热误差预测模型基础上建立自适应预测模型，并对模型中的参数进行辨识；最后，基于预测模型进行进给轴热误差的自适应补偿；具体步骤如下：

#### 第一步，进给轴热误差测试

温度传感器（11）布置在丝杠附近床身（9）上；激光干涉仪的激光头（1）通过三脚架布置在机床外部坚实地面上，干涉镜（6）通过磁力表座固定在主轴（5）上，反射镜（10）通过磁力表座固定在工作台（7）上；

进给轴热误差测试过程为：首先在初始热稳态下测试进给轴的全行程定位误差，记录温度传感器（11）数值；然后，进给轴以一定进给速度在一定范围内进行热机运动，直至热平衡；最后，进给轴停止在任意位置进行降温，直至重新达到热平衡；在此过程中每隔一定时间测试一次进给轴全行程定位误差，记录温度传感器（11）数值；

#### 第二步，进给轴热误差预测模型建立

将前轴承（3）至后轴承（12）之间的丝杠细分为  $N$  段，每段长度为  $L$ ；丝杠实时温度场的预测模型为：

$$T_i(t) = \frac{Q - \{h \times S \times [T_i(t - \Delta t) - T_f(t - \Delta t)] + \lambda \times A \frac{[2 \times T_i(t - \Delta t) - T_{i-1}(t - \Delta t) - T_{i+1}(t - \Delta t)]}{L}\} \times \Delta t}{c \times m} + T_i(t - \Delta t) \quad (1)$$

式中， $T_i(t)$  为第  $i$  段丝杠当前时刻的温度； $Q$  为螺母经过每段丝杠产生的热量； $T_i(t - \Delta t)$  为第  $i$  段丝杠前一时刻的温度； $\lambda$  为热传导系数； $A$  为丝杠的截面积； $T_{i-1}(t - \Delta t)$  为第  $i-1$  段丝杠前一时刻的温度； $T_{i+1}(t - \Delta t)$  为第  $i+1$  段丝杠前一时刻的温度； $h$  为对流散热系数； $S$  为每段丝杠与空气的换热面积； $T_f(t - \Delta t)$  为前一时

刻与丝杠表面接触的空气温度； $c$  为丝杠材料的比热容； $m$  为每段丝杠的质量；

进给轴在第  $I$  段丝杠位置热误差预测值  $E_s^I(t)$  的计算公式为：

$$E_s^I(t) = \sum_{i=1}^I (T_i(t) - T_0) \times L \times k_{coff} \quad (2)$$

式中， $T_0$  为丝杠初始温度， $k_{coff}$  为丝杠的热膨胀系数；

基于参数自动寻优方法，应用第一步中得到的误差和温度数据，按照式 (3)

对式 (1) 中的  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  等热特性参数进行有约束条件下的辨识；

$$\begin{aligned} \min[F(Q, h, \lambda)] &= \min\left[\sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V |E_t(u, v) - E_s(u, v)|\right] \\ Q_{\min} &\leq Q \leq Q_{\max} \\ h_{\min} &\leq h \leq h_{\max} \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda \leq \lambda_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $E_t(u, v)$  表示第  $u$  次热误差测试时第  $v$  个测试点的热膨胀误差测试值， $E_s(u, v)$  表示第  $u$  次热误差测试时第  $v$  个测试点的热膨胀误差预测值； $U$  为热误差测试的总次数， $V$  为进给轴每次测试的点数； $Q_{\min}$ 、 $h_{\min}$  和  $\lambda_{\min}$  分别为参数  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  的约束条件下限； $Q_{\max}$ 、 $h_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  分别为参数  $Q$ 、 $h$  和  $\lambda$  的约束条件上限；

第三步，热误差自适应补偿模型中参数辨识试验及数据处理

在螺母的五种状态分别为：状态 1 正常预紧；状态 2 预紧量减小 10%；状态 3 预紧量减小 20%；状态 4 预紧量增加 10%；状态 5 预紧量增加 20%；在五种状态下进行如下测试及数据处理：

设在  $M$  种螺母预紧状态下进行测试，其中正常预紧状态为状态 1；

(1) 在初始热稳态下，进给轴进行一次全行程快移运动；在运动的匀速段以一定周期同步记录位置及伺服电机的扭矩；

基于位置和扭矩数据，按式 (4) 计算快移运动时的平均扭矩：

$$\bar{M}_j = \frac{1}{K_j} \sum_{k=1}^{K_j} M_j(k) \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中,  $\bar{M}_j$  为第  $j$  种螺母预紧状态的平均扭矩;  $K_j$  为第  $j$  种螺母预紧状态下采集的扭矩数据个数;  $M_j(k)$  为第  $j$  种螺母预紧状态下采集的第  $k$  个扭矩值;

根据式(5)计算状态 2 至状态 5 的平均扭矩与状态 1 的平均扭矩之差  $\Delta\bar{M}_j$ ;

$$\Delta\bar{M}_j = \bar{M}_j - \bar{M}_1 \quad j = 2, 3, \dots, M \quad (5)$$

(2) 测试进给轴热机一定时间的热误差和床身温度; 基于第二步中的热误差预测模型和辨识出的  $h$  和  $\lambda$  值, 根据本组热误差和床身温度数据辨识出第 2 至第 5 种丝杠预紧状态对应的  $Q_j$ ,  $j = 2, 3, 4, 5$ ; 之后根据式(6)计算  $Q_j$  与第二步中辨识出的  $Q$  之差:

$$\Delta Q_j = Q_j - Q \quad j = 2, 3, \dots, M \quad (6)$$

第四步, 进给轴热误差自适应预测模型建立

$Q$  的变化量  $\Delta Q$  与平均扭矩差  $\Delta\bar{M}$  的关系模型如式(7)所示:

$$\Delta Q = \alpha \times \Delta\bar{M} + \beta \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为系数;

基于最小二乘法, 根据第三步中得到的数据  $\{\Delta Q_j, \bar{M}_j\}$ , 其中  $j = 2, 3, \dots, M$ , 对式(7)中的系数  $\alpha$  和  $\beta$  进行辨识;

第五步, 进给轴热误差自适应补偿实施

进给轴运行过程中实时采集并记录进给轴的位置、进给速度和伺服电机扭矩; 根据进给速度判断是否有连续  $R$  个采样周期的匀速快移运动; 若有, 则进行如下计算:

(1) 根据式(8)计算该  $R$  个周期内的平均扭矩:

$$\bar{M}_s = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^R M_s(k) \quad (8)$$

式中， $\bar{M}_s$ 为本次  $R$  个周期的平均扭矩， $M_s(k)$ 为本次  $R$  个周期中的第  $k$  个扭矩采集值；

(2) 设本次  $R$  个周期进给轴运行的位置区间为 $[P_0, P_1]$ ；在第三步中状态 1 时采集的扭矩数据中，提取位置区间 $[P_0, P_1]$ 内的扭矩值 $M_1^p(k), k = 1, 2, \dots, K_1^p$ ；并根据式 (9) 计算 $M_1^p$ 的平均值：

$$\bar{M}_1^p = \frac{1}{K_1^p} \sum_{k=1}^{K_1^p} M_1^p(k) \quad (9)$$

(3) 根据式 (10) 计算本次  $R$  个周期的平均扭矩差：

$$\Delta \bar{M}_s = \bar{M}_s - \bar{M}_1^p \quad (10)$$

(4) 根据 $\Delta \bar{M}_s$ ，基于式 (7) 计算出本次的 $\Delta Q_s$ ，根据式 (11) 自适应修正螺母经过每段丝杠产生的热量  $Q_{new}$ ：

$$Q_{new} = Q + \Delta Q_s \quad (11)$$

应用自适应修正后的 $Q_{new}$ ，基于式 (1) 和式 (2) 对进给轴热误差进行自适应预测；数控系统根据该预测值对进给轴进行自适应实时补偿。

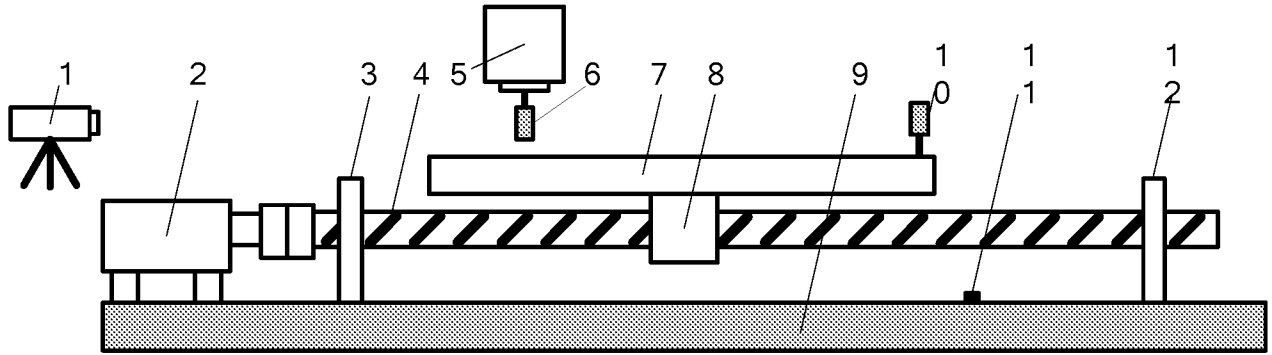


图 1

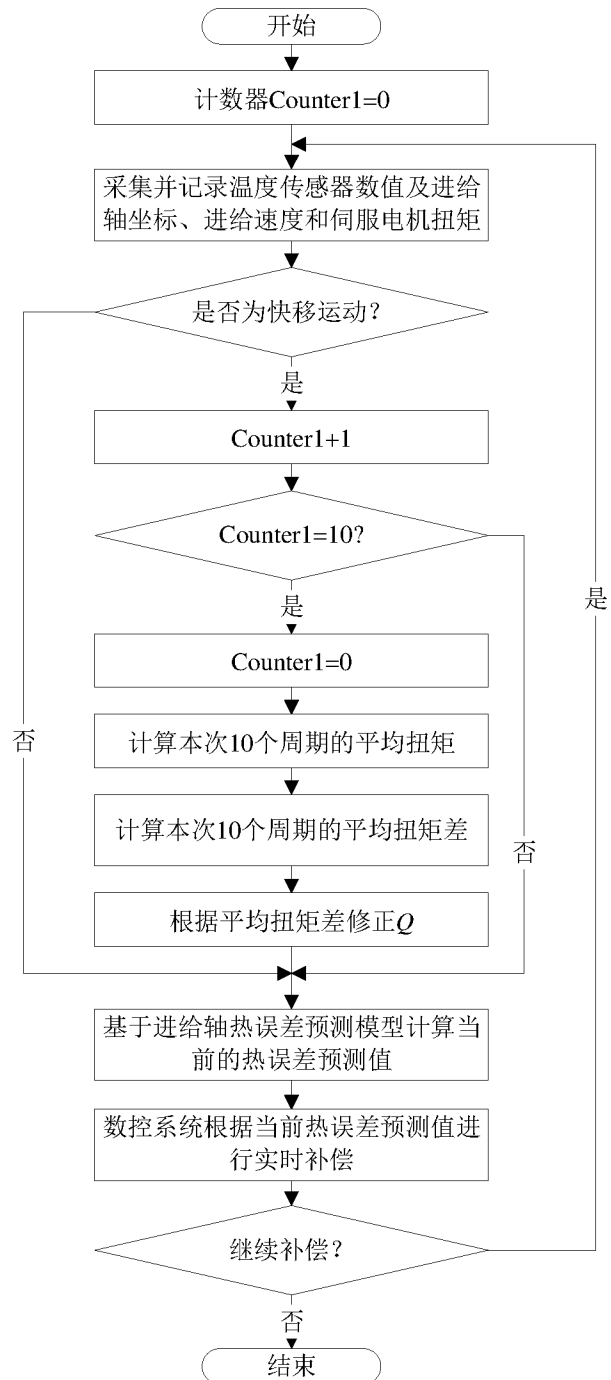


图 2

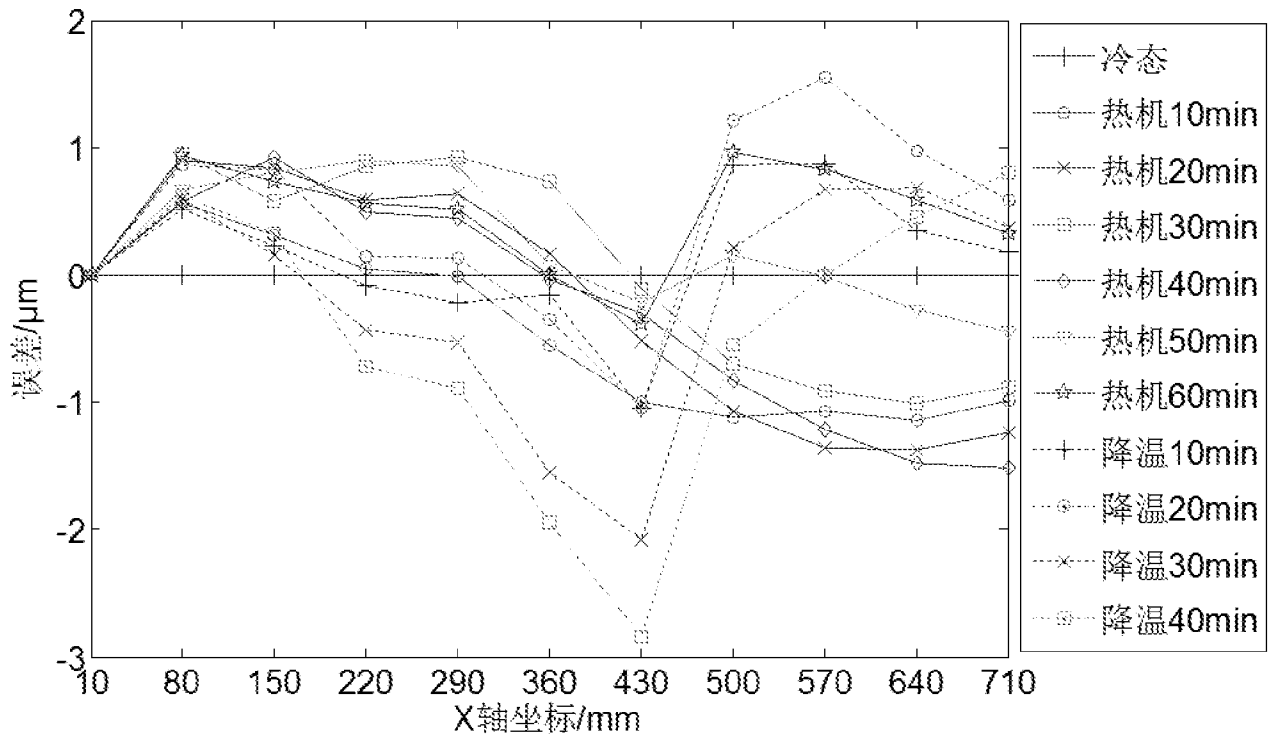


图 3(a)

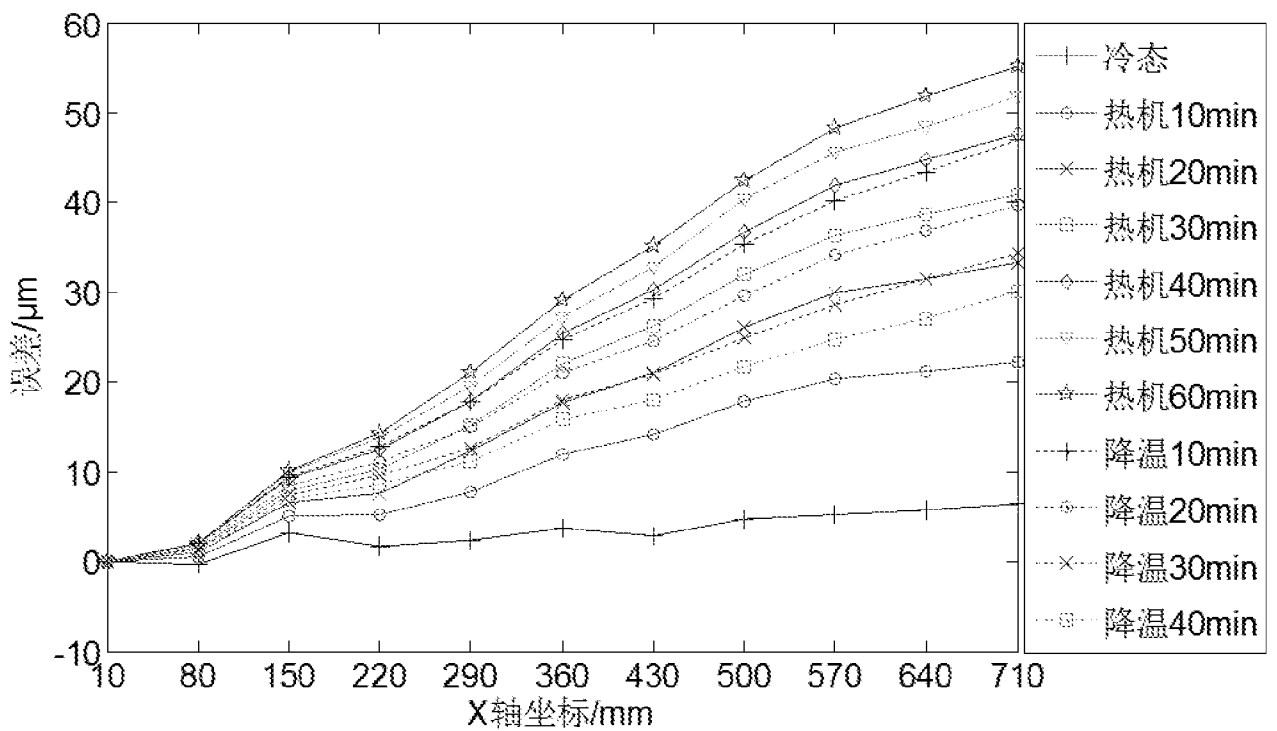


图 3(b)

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/075714

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G05B 19/404(2006.01)i; B23Q 15/18(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)

G05B 19; B23Q 15

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; CNTXT; VEN; DWPI; CNKI: 热量, 激光, 传感器, 测, 温度, 螺母, 机床, thermal, laser, detect, sense, temperature, nut, lathe

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                        | Relevant to claim No. |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 107065771 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 18 August 2017 (2017-08-18)<br>description, paragraphs [0010]-[0051], and figures 1-3(b) | 1                     |
| A         | CN 102794671 A (PRECISION MACHINERY RESEARCH & DEVELOPMENT CENTER) 28 November 2012 (2012-11-28)<br>entire document                       | 1                     |
| A         | CN 108803484 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 13 November 2018 (2018-11-13)<br>entire document                                         | 1                     |
| A         | CN 109143967 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 04 January 2019 (2019-01-04)<br>entire document                                          | 1                     |
| A         | CN 106736848 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) 31 May 2017 (2017-05-31)<br>entire document                                                    | 1                     |
| A         | CN 102528558 A (FANUC CORPORATION) 04 July 2012 (2012-07-04)<br>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

“&amp;” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 October 2019

Date of mailing of the international search report

01 November 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**

International application No.

**PCT/CN2019/075714****C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages       | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2010082724 A (BROTHER INDUSTRIES, LTD.) 15 April 2010 (2010-04-15)<br>entire document | 1                     |
| A         | JP 4358786 B2 (OKUMA CORPORATION) 04 November 2009 (2009-11-04)<br>entire document       | 1                     |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/CN2019/075714**

| Patent document<br>cited in search report |            |    | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) |                 | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|------------|----|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| CN                                        | 107065771  | A  | 18 August 2017                       | CN                      | 107065771 B     | 01 February 2019                     |
| CN                                        | 102794671  | A  | 28 November 2012                     | CN                      | 102794671 B     | 19 November 2014                     |
| CN                                        | 108803484  | A  | 13 November 2018                     | None                    |                 |                                      |
| CN                                        | 109143967  | A  | 04 January 2019                      | None                    |                 |                                      |
| CN                                        | 106736848  | A  | 31 May 2017                          | CN                      | 106736848 B     | 12 April 2019                        |
| CN                                        | 102528558  | A  | 04 July 2012                         | DE                      | 102011055036 A1 | 16 May 2012                          |
|                                           |            |    |                                      | JP                      | 2012101330 A    | 31 May 2012                          |
|                                           |            |    |                                      | JP                      | 4917665 B1      | 18 April 2012                        |
|                                           |            |    |                                      | US                      | 8924003 B2      | 30 December 2014                     |
|                                           |            |    |                                      | US                      | 2012123586 A1   | 17 May 2012                          |
|                                           |            |    |                                      | DE                      | 102011055036 B4 | 12 December 2013                     |
| JP                                        | 2010082724 | A  | 15 April 2010                        | None                    |                 |                                      |
| JP                                        | 4358786    | B2 | 04 November 2009                     | JP                      | 2006334699 A    | 14 December 2006                     |

## 国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/075714

## A. 主题的分类

G05B 19/404(2006.01)i; B23Q 15/18(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)

G05B 19; B23Q 15

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;CNTXT;VEN;DWPI;CNKI:热量, 激光, 传感器, 测, 温度, 螺母, 机床, thermal, laser, detect, sense, temperature, nut, lathe

## C. 相关文件

| 类 型* | 引用文件, 必要时, 指明相关段落                                                                    | 相关的权利要求 |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| A    | CN 107065771 A (大连理工大学) 2017年 8月 18日 (2017 - 08 - 18)<br>说明书第[0010]-[0051]段、附图1-3(b) | 1       |
| A    | CN 102794671 A (财团法人精密机械研究发展中心) 2012年 11月 28日 (2012 - 11 - 28)<br>全文                 | 1       |
| A    | CN 108803484 A (大连理工大学) 2018年 11月 13日 (2018 - 11 - 13)<br>全文                         | 1       |
| A    | CN 109143967 A (大连理工大学) 2019年 1月 4日 (2019 - 01 - 04)<br>全文                           | 1       |
| A    | CN 106736848 A (西安交通大学) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31)<br>全文                          | 1       |
| A    | CN 102528558 A (发那科株式会社) 2012年 7月 4日 (2012 - 07 - 04)<br>全文                          | 1       |
| A    | JP 2010082724 A (BROTHER IND LTD) 2010年 4月 15日 (2010 - 04 - 15)<br>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

“&amp;” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 10月 28日

国际检索报告邮寄日期

2019年 11月 1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

苑丛

电话号码 62089674

| C. 相关文件 |                                                                |         |
|---------|----------------------------------------------------------------|---------|
| 类 型*    | 引用文件，必要时，指明相关段落                                                | 相关的权利要求 |
| A       | JP 4358786 B2 (OKUMA CORP) 2009年 11月 4日 (2009 - 11 - 04)<br>全文 | 1       |

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/075714

| 检索报告引用的专利文件 |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利               | 公布日<br>(年/月/日) |
|-------------|------------|----|----------------|--------------------|----------------|
| CN          | 107065771  | A  | 2017年 8月 18日   | CN 107065771 B     | 2019年 2月 1日    |
| CN          | 102794671  | A  | 2012年 11月 28日  | CN 102794671 B     | 2014年 11月 19日  |
| CN          | 108803484  | A  | 2018年 11月 13日  | 无                  |                |
| CN          | 109143967  | A  | 2019年 1月 4日    | 无                  |                |
| CN          | 106736848  | A  | 2017年 5月 31日   | CN 106736848 B     | 2019年 4月 12日   |
| CN          | 102528558  | A  | 2012年 7月 4日    | DE 102011055036 A1 | 2012年 5月 16日   |
|             |            |    |                | JP 2012101330 A    | 2012年 5月 31日   |
|             |            |    |                | JP 4917665 B1      | 2012年 4月 18日   |
|             |            |    |                | US 8924003 B2      | 2014年 12月 30日  |
|             |            |    |                | US 2012123586 A1   | 2012年 5月 17日   |
|             |            |    |                | DE 102011055036 B4 | 2013年 12月 12日  |
| JP          | 2010082724 | A  | 2010年 4月 15日   | 无                  |                |
| JP          | 4358786    | B2 | 2009年 11月 4日   | JP 2006334699 A    | 2006年 12月 14日  |