

(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 2020/155226 A1

(51) 国际专利分类号:
G05B 19/18 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/075710

(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:
201910099627.X 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)。 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)。 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)。 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)。 牛蒙蒙(NIU, Mengmeng); 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)。 班仔优

(54) **Title:** METHOD OF DETERMINING PRELOADING LEVEL OF LEAD SCREW USING THERMAL ERROR AND TEMPERATURE-INCREASE WEIGHTING

(54) 发明名称: 基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法

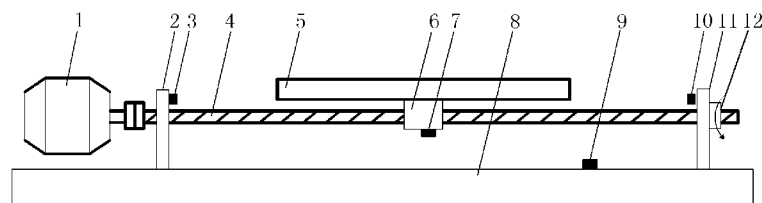


图 1

(57) **Abstract:** Provided is a method of determining the preloading level of a lead screw using thermal error and temperature-increase weighting, pertaining to the field of assembly of computer numerical control machine tools. The method comprises: under different preloading states of a lead screw, conducting thermal behavior testing of a feed shaft under a typical operating condition, and acquiring a maximum thermal error and a temperature increase at a critical temperature testing point of the lead screw under each preloading state; establishing a mathematical model of the maximum thermal error and the temperature increase at the critical temperature testing point with respect to a lead screw preloading level, performing optimization by using a weighting function of the maximum thermal error and a temperature increase at each temperature testing point as an objective function, and obtaining an optimal preloading level of the lead screw. The method comprehensively considers a thermal error of a feed shaft and a temperature increase at a critical point to determine an optimal preloading level of a lead screw, and solves the problem in which an optimal effect is difficult to achieve by using existing empirical methods for preloading a lead screw, thereby improving machining precision and precision stability of machine tools, and guaranteeing the service life of movable components such as a bearing.

(57) **摘要:** 本发明提供了基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法, 属于数控机床装配领域。首先在丝杠的不同预紧状态下, 进行典型工况下的进给轴热行为试验, 获取丝杠在各种预紧状态下的最大热误差和关键温度测点的温升; 然后, 建立丝杠预紧量与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型; 最后, 以最大热误差和各温度测点温升的加权函数为目标函数进行优化, 得出丝杠的最优预紧量。该方法综合考虑进给轴的热误差和关键点温升确定丝杠的最优预紧量, 解决了目前基于经验的丝杠预紧方法难以达到最优效果的问题, 可以提高机床的加工精度和精度稳定性, 并确保轴承等运动部件的使用寿命。

(BAN, Ziyu); 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。

(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))。

基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法

技术领域

本发明属于数控机床装配技术领域，具体为一种基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法。

背景技术

在进给轴运行过程中，螺母与丝杠的摩擦会产生大量热量，该热量传递到丝杠上则会导致丝杠热伸长。若进给轴采用半闭环控制方式，丝杠热伸长就会引起该轴定位精度的变化，这种变化就是进给轴的热误差。该热误差最终会影响工件的加工精度和批量加工的精度一致性。

为了减小半闭环进给轴的热误差，常用的方法是对丝杠进行预紧，即通过预紧螺母对丝杠施加轴向预紧力，使丝杠产生适量的轴向预拉伸。预紧螺母的预紧角度越大，丝杠的预拉伸量就越大。当丝杠受热时，将会先抵消丝杠由于预拉伸产生的内部应力，而不会伸长。当内部应力被完全抵消后，丝杠才会受热伸长。这样可有效减小进给轴的热误差。

目前通过丝杠预紧方式减小进给轴热误差的方法存在以下不足：丝杠的预紧量一般基于经验确定且主要考虑对热误差的抑制效果，这种方式很难达到最优的效果。若丝杠预紧量偏小，则对热误差的抑制效果不够；若丝杠预紧量偏大，虽然对热误差抑制效果较好，但会造成丝杠的前后轴承温升过大，从而加速轴承的磨损，缩短使用寿命。在专利《一种数控机床进给系统滚珠丝杠预紧力的试验优化方法》（申请号：201610285987.5）中，虽然提出了以进给轴定位精度和动态特性为指标的丝杠预紧力优化方法，但没有考虑丝杠预紧力对热误差和前后轴承温升的影响，因此采用该方法得到的最优丝杠预紧力并不能满足对热误差抑制和温升控制的共同要求。

发明内容

本发明针对目前缺乏综合考虑热误差和温升的最优预紧量确定方法的现状，提出一种基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法，综合考虑进给轴热误差的抑制和关键测点温升的控制，得出丝杠的最优预紧量。

本发明的技术方案为：

基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法，首先在丝杠的不同预紧状态下，进行典型工况下的进给轴热行为试验，获取丝杠在各种预紧状态下的最大热误差和关键温度测点的温升；然后，建立丝杠预紧量分别与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型；最后，以最大热误差和各温度测点温升的加权函数为目标函数进行优化，得出丝杠的最优预紧量；具体步骤如下：

第一步，典型工况下的进给轴热行为试验

将第一温度传感器 3 布置在进给系统的前轴承 2 上，第二温度传感器 7 布置在螺母 6 上，第三温度传感器 10 布置在进给系统的后轴承 11 上，第四温度传感器 9 布置在丝杠附近的床身 8 上；

对机床加工工件时的运动轨迹进行分析，提取进给轴的运动信息，包括行程范围、进给速度和运行频率；

在丝杠的不同预紧状态下，丝杠预紧量以预紧螺母 12 的预紧角度衡量，分别进行进给轴热行为试验：在初始热稳态时，使用激光干涉仪测试进给轴的全行程定位误差，并记录第一温度传感器 3、第二温度传感器 7、第三温度传感器 10 和第四温度传感器 9 的温度值；然后，让进给轴在运动信息下进行热机，运动过程中每隔一段时间（约 15min）测试一次全行程定位误差，并记录各测点的温度；重复热机和测试过程，直至丝杠达到热平衡；

第二步，计算进给轴的最大热误差和关键温度测点的温升

基于第一步采集的热误差和温度数据，在每种预紧状态下进给轴最大热误差按式（1）计算：

$$E_{\max_i} = E_i(M_i, N) - E_i(1, N) \quad (1)$$

式中： $E_{\max_i}$ 为采用第*i*种预紧量时的最大热误差， M_i 为采用第*i*种预紧量时的定位误差测试次数， N 为定位误差测试的点数， $E_i(M_i, N)$ 为采用第*i*种预紧量时第 M_i 次定位误差测试的第 N 点数据， $E_i(1, N)$ 为采用第*i*种预紧量时第1次定位误差测试的第 N 点数据；

每种预紧量下的各温度测点温升按式（2）计算：

$$\Delta T_{i,j} = [T_{i,j}(M_i) - T_{i,j}(1)] - [T_{i,4}(M_i) - T_{i,4}(1)] \quad (2)$$

式中： $\Delta T_{i,j}$ 为采用第*i*种预紧量时第*j*个温度传感器的温升， $T_{i,j}(M_i)$ 为采用第*i*种预紧量时第*j*个温度传感器的第 M_i 次测量值， $T_{i,j}(1)$ 为采用第*i*种预紧量时第*j*个温度传感器的第1次测量值， $T_{i,4}(M_i)$ 为采用第*i*种预紧量时第四温度传感器9的第 M_i 次测量值， $T_{i,4}(1)$ 为采用第*i*种预紧量时第四温度传感器9的第1次测量值；

第三步，建立丝杠预紧量分别与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型

丝杠预紧量与进给轴最大热误差的关系如式（3）：

$$E_{\max} = a_0 - a_1 \times A \quad (3)$$

式中： $E_{\max}$ 为进给轴最大热误差， A 为丝杠预紧量即预紧螺母12的锁紧角度， a_0 和 a_1 为系数；

丝杠预紧量与第*j*个温度传感器温升的数学模型如式（4）所示：

$$\Delta T_j = b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)} \quad (4)$$

式中： ΔT_j 为第*j*个温度传感器的温升， $b_{j,0}$ 、 $b_{j,1}$ 和 $b_{j,2}$ 为系数；

根据第二步得到的丝杠在不同预紧量下的最大热误差和温升数据，基于最小二乘法辨识式（3）和式（4）中的系数 a_0 、 a_1 、 $b_{j,0}$ 、 $b_{j,1}$ 和 $b_{j,2}$ ；

第四步，计算丝杠的最优预紧量

最大热误差和关键温度测点温升的加权函数如式（5）所示：

$$F(E_{\max}, \Delta T_j) = \lambda_0 \times E_{\max} + \sum_{j=1}^3 \lambda_j \Delta T_j \quad (5)$$

式中： λ_0 为进给轴最大热误差的权系数， λ_j 为第 j 个温度传感器温升的权系数；

根据式（3）和式（4）将式（5）改写为：

$$F(A) = \lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)}) \quad (6)$$

基于式（7）进行自动寻优，得出丝杠的最优预紧量；

$$\min[F(A)] = \min[\lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)})] \quad (7)$$

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max}$$

式中： $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 分别为自动寻优过程中丝杠预紧量 A 的下限和上限。

本发明的有益效果为：综合考虑了进给轴的热误差和运动部件的温升，通过典型工况下的进给轴热行为试验和预紧量计算方法得到丝杠的最优预紧量，解决了目前基于经验的丝杠预紧方法难以达到最优效果的问题。按照本发明提出的丝杠预紧量确定方法对丝杠进行预紧，可以在有效减小进给轴热误差的同时有效控制轴承等运动部件的温升，从而提高机床的加工精度和精度稳定性，并确保轴承等运动部件的使用寿命。

附图说明

图 1 为进给轴温度测点布置示意图。

图 2 为最大热误差建模效果图。

图 3 (a) 为第一温度传感器温升建模效果图。

图 3 (b) 为第二温度传感器温升建模效果图。

图 3 (c) 为第三温度传感器温升建模效果图。

图中：1 进给轴电机；2 丝杠前轴承；3 第一温度传感器；4 丝杠；5 工作台；6 螺母；7 第二温度传感器；8 床身；9 第四温度传感器；10 第三温度传感器；11 后轴承；12 预紧螺母。

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的 X 轴为例，详细说明本发明的实施方式。该加工中心 X 轴行程为 0~500mm，最大进给速度为 32000mm/min。

第一步，典型工况下的进给轴热行为试验

将第一温度传感器 3 布置在进给系统的前轴承 2 上，第二温度传感器 7 布置在螺母 6 上，第三温度传感器 10 布置在进给系统的后轴承 11 上，第四温度传感器 9 布置在丝杠附近的床身 8 上。

被测加工中心面向消费电子行业，加工的典型工件为手机和平板电脑的铝制外壳，根据加工过程确定其典型工况为：常用行程范围为-100~400mm；常用进给速度为 2000mm/min；加工频率为单个工件平均加工时间 90s，工件加工间隔时间 15s。

分别在预紧螺母的锁紧角度为 0°、60°、120°、180°和 270°的状态下进行进给轴热行为试验：

在进给轴初始热稳态时，使用激光干涉仪测试进给轴的全行程定位误差，并记录第一温度传感器 3、第二温度传感器 7、第三温度传感器 10 和第四温度

传感器 9 的温度值。然后，让进给轴在典型运动信息下进行热机，热机程序如表 1 所示。

表 1 热机的 CNC 程序

AAA:	G4F1
BBB:	REPEAT BBB P=14
G90 G1 X-400 F2000	G4F15
G4F1	goto AAA
X-100	M30
下转第二列	完毕

运动过程中每隔 15min 测试一次全行程定位误差，并记录第一温度传感器 3、第二温度传感器 7、第三温度传感器 10 和第四温度传感器 9 的温度值。热机运动进行 2 小时后进给轴达到热平衡，测试停止。

第二步，计算进给轴的最大热误差和关键温度测点的温升

基于第一步采集的热误差和温度数据，在每种预紧状态下进给轴最大热误差按式（1）计算：

$$E_{\max_i} = E_i(M_i, N) - E_i(1, N) \quad (1)$$

式中： $E_{\max_i}$ 为采用第 i 种预紧量时的最大热误差， M_i 为采用第 i 种预紧量时的定位误差测试次数， N 为定位误差测试的点数， $E_i(M_i, N)$ 为采用第 i 种预紧量时第 M_i 次定位误差测试的第 N 点数据， $E_i(1, N)$ 为采用第 i 种预紧量时第 1 次定位误差测试的第 N 点数据。

每种预紧量下的各温度测点温升按式（2）计算：

$$\Delta T_{i,j} = [T_{i,j}(M_i) - T_{i,j}(1)] - [T_{i,4}(M_i) - T_{i,4}(1)] \quad (2)$$

式中： $\Delta T_{i,j}$ 为采用第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的温升， $T_{i,j}(M_i)$ 为采用

第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的第 M_i 次测量值, $T_{i,j}(1)$ 为采用第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的第 1 次测量值, $T_{i,4}(M_i)$ 为采用第 i 种预紧量时第四温度传感器 9 的第 M_i 次测量值, $T_{i,4}(1)$ 为采用第 i 种预紧量时第四温度传感器 9 的第 1 次测量值。

根据式 (1) 和式 (2) 计算出丝杠在每种预紧量时的最大热误差和各温度测点温升, 具体结果如表 2 所示。

表 2 最大热误差和温升数据汇总表

预紧量/ $^{\circ}$	最大热误差/ μm	第一温度传感器温升/ $^{\circ}\text{C}$	第二温度传感器温升/ $^{\circ}\text{C}$	第三温度传感器温升/ $^{\circ}\text{C}$
0	29.6	3.24	2.89	2.76
60	27.2	3.35	2.97	2.98
120	20.6	3.47	3.11	3.36
180	13.5	4.01	2.94	3.97
270	8.8	5.23	3.05	4.98

第三步, 建立丝杠预紧量与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型

丝杠预紧量与进给轴最大热误差的关系如式 (3):

$$E_{\max} = a_0 - a_1 \times A \quad (3)$$

式中: $E_{\max}$ 为进给轴最大热误差, A 为丝杠预紧量 (即预紧螺母 12 的锁紧角度), a_0 和 a_1 为系数。

预紧量与第 j 个温度传感器温升的数学模型如式 (4) 所示:

$$\Delta T_j = b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)} \quad (4)$$

式中: ΔT_j 为第 j 个温度传感器的温升, $b_{j,0}$ 、 $b_{j,1}$ 和 $b_{j,2}$ 为系数。

根据第二步得到的丝杠在不同预紧量下的最大热误差和温升数据, 基于最

小二乘法, 根据式 (3) 和式 (4) 可以得出模型中的系数, 具体为: $a_0=30.418$ 、 $a_1=0.083$ 、 $b_{1,0}=3.073$ 、 $b_{1,1}=0.15$ 、 $b_{1,2}=0.010$ 、 $b_{2,0}=0.718$ 、 $b_{2,1}=2.220$ 、 $b_{2,2}=0.0002$ 、 $b_{3,0}=1.814$ 、 $b_{3,1}=0.912$ 和 $b_{3,2}=0.005$ 。最大热误差建模效果如图 2 所示, 第一至第三温度传感器温升的建模效果如图 3 (a) ~图 3 (c) 所示。

第四步, 计算丝杠的最优预紧量

最大热误差和关键温度测点温升的加权函数如式 (5) 所示:

$$F(E_{\max}, \Delta T_j) = \lambda_0 \times E_{\max} + \sum_{j=1}^3 \lambda_j \Delta T_j \quad (5)$$

式中: λ_0 为进给轴最大热误差的权系数, λ_j 为第 j 个温度传感器温升的权系数。

根据式 (3) 和式 (4) 将式 (5) 改写为:

$$F(A) = \lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)}) \quad (6)$$

综合考虑对热误差抑制效果和温升控制, 设置式 (6) 中的权系数为: $\lambda_0=0.15$ 、 $\lambda_1=0.8$ 、 $\lambda_2=0.1$ 和 $\lambda_3=0.8$ 。

基于式 (7) 进行自动寻优,

$$\min[F(A)] = \min[\lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)})] \quad (7)$$

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max}$$

可以得到立式加工中心 X 轴丝杠的最优预紧量为 156° 。

权利要求书

1.一种基于热误差和温升加权的丝杠预紧量确定方法，首先在丝杠的不同预紧状态下，进行典型工况下的进给轴热行为试验，获取丝杠在各种预紧状态下的最大热误差和关键温度测点的温升；然后，建立丝杠预紧量分别与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型；最后，以最大热误差和各温度测点温升的加权函数为目标函数进行优化，得出丝杠的最优预紧量；其特征在于，步骤如下：

第一步，典型工况下的进给轴热行为试验

将第一温度传感器（3）布置在进给系统的前轴承（2）上，第二温度传感器（7）布置在螺母（6）上，第三温度传感器（10）布置在进给系统的后轴承（11）上，第四温度传感器（9）布置在丝杠附近的床身（8）上；

对机床加工工件时的运动轨迹进行分析，提取进给轴的运动信息，包括行程范围、进给速度和运行频率；

在丝杠的不同预紧状态下，丝杠预紧量以预紧螺母（12）的预紧角度衡量，分别进行进给轴热行为试验：在初始热稳态时，使用激光干涉仪测试进给轴的全行程定位误差，并记录第一温度传感器（3）、第二温度传感器（7）、第三温度传感器（10）和第四温度传感器（9）的温度值；然后，让进给轴在运动信息下进行热机，运动过程中每隔一段时间测试一次全行程定位误差，并记录各测点的温度；重复热机和测试过程，直至丝杠达到热平衡；

第二步，计算进给轴的最大热误差和关键温度测点的温升

基于第一步采集的热误差和温度数据，在每种预紧状态下进给轴最大热误差按式（1）计算：

$$E_{\max_i} = E_i(M_i, N) - E_i(1, N) \quad (1)$$

式中： $E_{\max_i}$ 为采用第*i*种预紧量时的最大热误差， M_i 为采用第*i*种预紧量时的定位误差测试次数， N 为定位误差测试的点数， $E_i(M_i, N)$ 为采用第*i*种预紧

量时第 M_i 次定位误差测试的第 N 点数据, $E_i(1,N)$ 为采用第 i 种预紧量时第 1 次定位误差测试的第 N 点数据;

每种预紧量下的各温度测点温升按式 (2) 计算:

$$\Delta T_{i,j} = [T_{i,j}(M_i) - T_{i,j}(1)] - [T_{i,4}(M_i) - T_{i,4}(1)] \quad (2)$$

式中: $\Delta T_{i,j}$ 为采用第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的温升, $T_{i,j}(M_i)$ 为采用第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的第 M_i 次测量值, $T_{i,j}(1)$ 为采用第 i 种预紧量时第 j 个温度传感器的第 1 次测量值, $T_{i,4}(M_i)$ 为采用第 i 种预紧量时第四温度传感器 (9) 的第 M_i 次测量值, $T_{i,4}(1)$ 为采用第 i 种预紧量时第四温度传感器 (9) 的第 1 次测量值;

第三步, 建立丝杠预紧量分别与最大热误差和关键温度测点温升的数学模型

丝杠预紧量与进给轴最大热误差的关系如式 (3):

$$E_{\max} = a_0 - a_1 \times A \quad (3)$$

式中: $E_{\max}$ 为进给轴最大热误差, A 为丝杠预紧量即预紧螺母 (12) 的锁紧角度, a_0 和 a_1 为系数;

丝杠预紧量与第 j 个温度传感器温升的数学模型如式 (4) 所示:

$$\Delta T_j = b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)} \quad (4)$$

式中: ΔT_j 为第 j 个温度传感器的温升, $b_{j,0}$ 、 $b_{j,1}$ 和 $b_{j,2}$ 为系数;

根据第二步得到的丝杠在不同预紧量下的最大热误差和温升数据, 基于最小二乘法辨识式 (3) 和式 (4) 中的系数 a_0 、 a_1 、 $b_{j,0}$ 、 $b_{j,1}$ 和 $b_{j,2}$;

第四步, 计算丝杠的最优预紧量

最大热误差和关键温度测点温升的加权函数如式 (5) 所示:

$$F(E_{\max}, \Delta T_j) = \lambda_0 \times E_{\max} + \sum_{j=1}^3 \lambda_j \Delta T_j \quad (5)$$

式中： λ_0 为进给轴最大热误差的权系数， λ_j 为第 j 个温度传感器温升的权系数；

根据式（3）和式（4）将式（5）改写为：

$$F(A) = \lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)}) \quad (6)$$

基于式（7）进行自动寻优，得出丝杠的最优预紧量；

$$\min[F(A)] = \min[\lambda_0 \times (a_0 - a_1 \times A) + \sum_{j=1}^3 \lambda_j (b_{j,0} + b_{j,1} \times e^{(b_{j,2} \times A)})] \quad (7)$$

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max}$$

式中： $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 分别为自动寻优过程中丝杠预紧量 A 的下限和上限。

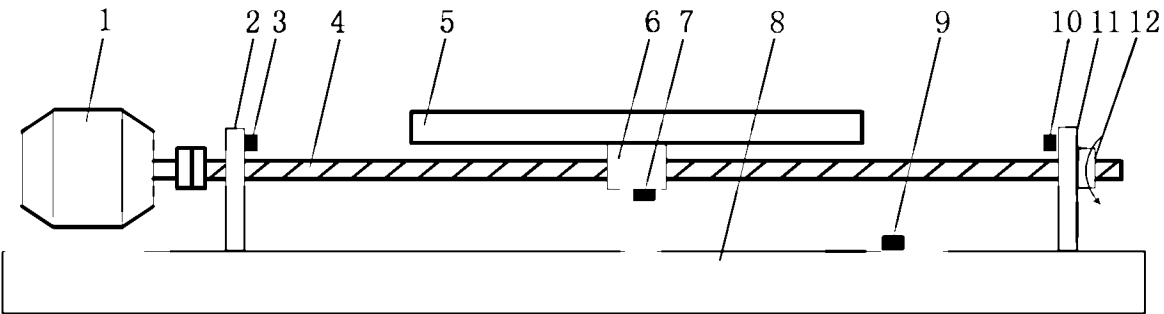


图 1

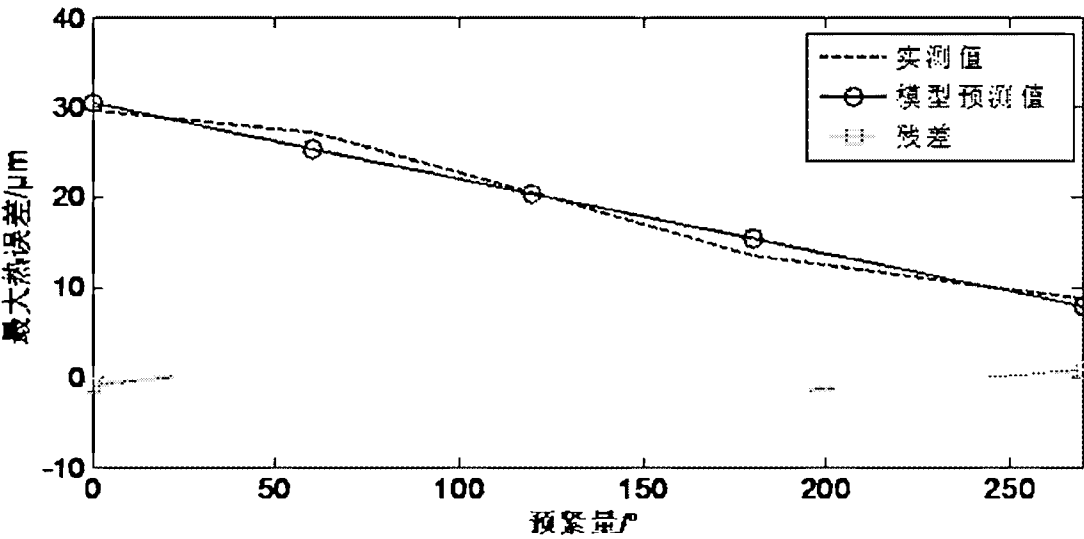


图 2

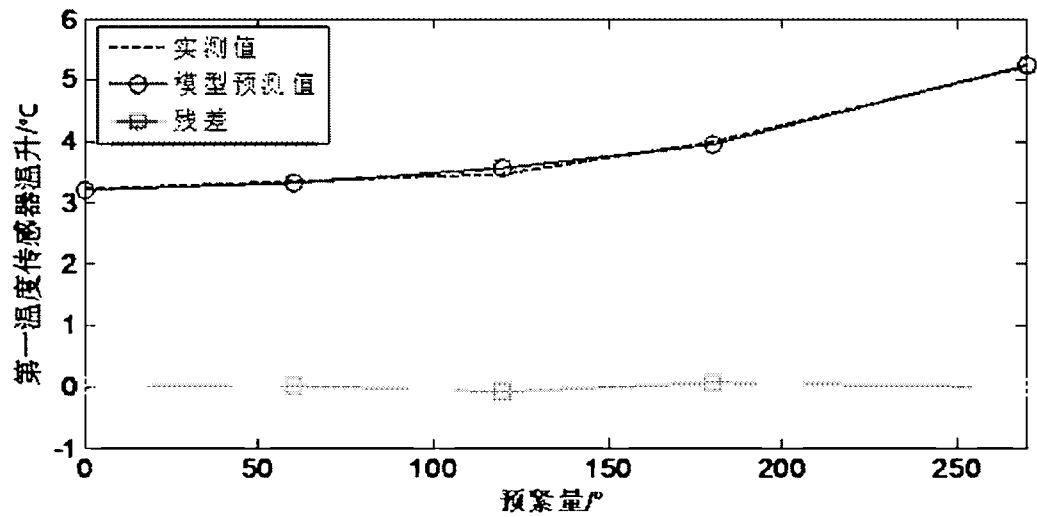


图 3 (a)

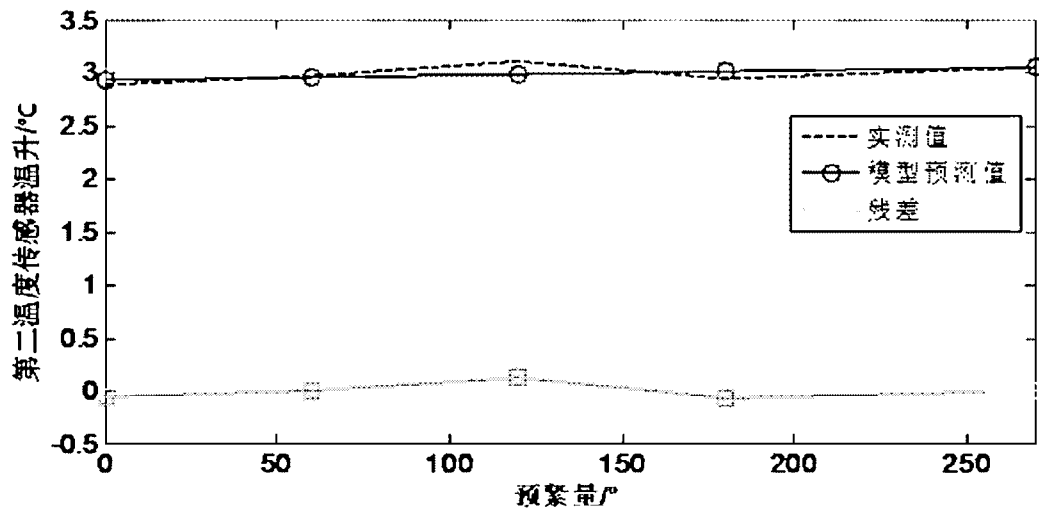


图 3 (b)

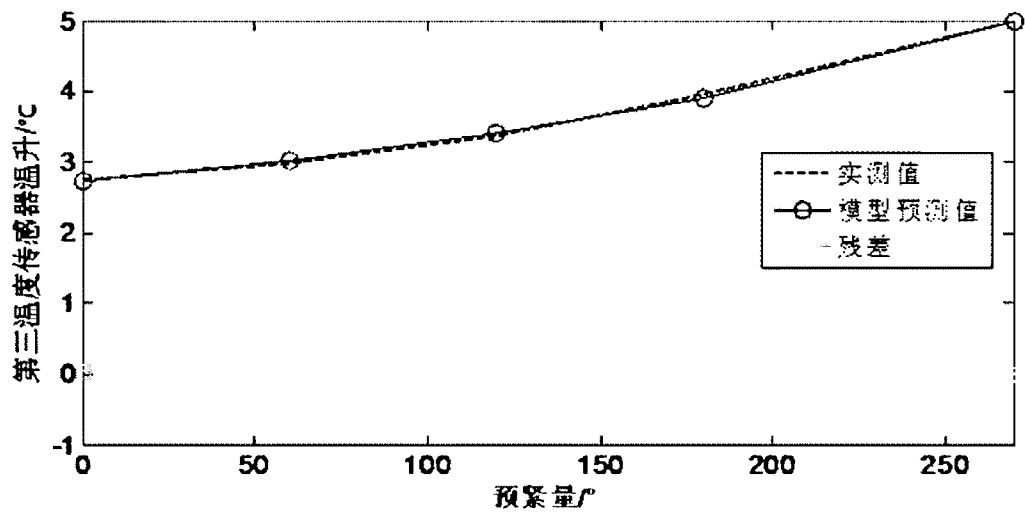


图 3 (c)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/075710

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 19/18(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; G06F

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)

CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; CPRSABS; JPABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS: axis, pretension, weight, thermal error, screw, optimal, function, temperature, preload, bearing, 预载, 热误差, 丝杠, 最优, 函数, 螺杆, 轴, 加权, 温度, 预紧量

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107420504 A (WANAN HENGYUAN INTELLIGENT EQUIPMENT CO., LTD.) 01 December 2017 (2017-12-01) entire description	1
A	CN 107255530 A (NANJING UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 17 October 2017 (2017-10-17) entire description	1
A	CN 104483896 A (PUSH NINGJIANG MACHINE TOOL CO., LTD.) 01 April 2015 (2015-04-01) entire description	1
A	CN 108637770 A (NANTONG GUOSHENG INTELLIGENCE TECHNOLOGY GROUP CO., LTD.) 12 October 2018 (2018-10-12) entire description	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

03 April 2019

Date of mailing of the international search report

22 April 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
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/CN2019/075710

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)
CN	107420504	A	01 December 2017	None		
CN	107255530	A	17 October 2017	None		
CN	104483896	A	01 April 2015	CN	104483896	B 17 May 2017
CN	108637770	A	12 October 2018	None		

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/075710

A. 主题的分类 G05B 19/18 (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; G06F 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)) CPEA; CNMED; PLABS; AUABS; DWPI; TWABS; CPRSABS; JPABS; FRABS; TWMED; HKABS; CNABS; SGABS; LEXIS; MOABS; ILABS; SIPOABS: axis, pretension, weight, thermal error, screw, optimal, function, temperature, preload, bearing, 预载, 热误差, 丝杠, 最优, 函数, 螺杆, 轴, 加权, 温度, 预紧量																	
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 107420504 A (万安衡源智能装备有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 107255530 A (南京理工大学) 2017年 10月 17日 (2017 - 10 - 17) 说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104483896 A (四川普什宁江机床有限公司) 2015年 4月 1日 (2015 - 04 - 01) 说明书全文</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 108637770 A (南通国盛智能科技集团股份有限公司) 2018年 10月 12日 (2018 - 10 - 12) 说明书全文</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 107420504 A (万安衡源智能装备有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书全文	1	A	CN 107255530 A (南京理工大学) 2017年 10月 17日 (2017 - 10 - 17) 说明书全文	1	A	CN 104483896 A (四川普什宁江机床有限公司) 2015年 4月 1日 (2015 - 04 - 01) 说明书全文	1	A	CN 108637770 A (南通国盛智能科技集团股份有限公司) 2018年 10月 12日 (2018 - 10 - 12) 说明书全文	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 107420504 A (万安衡源智能装备有限公司) 2017年 12月 1日 (2017 - 12 - 01) 说明书全文	1															
A	CN 107255530 A (南京理工大学) 2017年 10月 17日 (2017 - 10 - 17) 说明书全文	1															
A	CN 104483896 A (四川普什宁江机床有限公司) 2015年 4月 1日 (2015 - 04 - 01) 说明书全文	1															
A	CN 108637770 A (南通国盛智能科技集团股份有限公司) 2018年 10月 12日 (2018 - 10 - 12) 说明书全文	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 4月 3日		国际检索报告邮寄日期 2019年 4月 22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		受权官员 黄渊 电话号码 86-010-62411769															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/075710

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	107420504	A	2017年 12月 1日	无	
CN	107255530	A	2017年 10月 17日	无	
CN	104483896	A	2015年 4月 1日	CN 104483896 B	2017年 5月 17日
CN	108637770	A	2018年 10月 12日	无	