

文章编号 1004-924X(2011)05-1151-08

伺服系统中滚珠丝杠的温度场模型

陈 诚¹, 裘祖荣¹, 李醒飞^{1*}, 董成军¹, 张晨阳²

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;

2. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 300131)

摘要:分析了伺服系统中丝杠螺母的热特性规律,并对丝杠温度场进行了简化建模,以快速准确地预测丝杠温度分布及变化。简化模型能较好地预测丝杠温升过程,但稳态误差较大;通过引进时间修正系数修正了该简化模型,修正后的模型能较好地预测丝杠的稳态温度,但对温度上升过程的预测误差较大;鉴于两个模型的特点,基于分段建模的思想,建立了丝杠温度场分段模型,并辨识了模型参数。实验结果表明,不同单热源实验条件下,预测温度误差值在0.5℃以内;双热源实验条件下,预测温度误差值在0.8℃以内;显示该模型能较好地预测丝杠温度随时间的变化。

关键词:滚珠丝杠;温度场;分段模型;参数辨识

中图分类号:TH161.4; TP312 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.1151

Temperature field model of ball screws used in servo systems

CHEN Cheng¹, QIU Zu-rong¹, LI Xing-fei^{1*}, DONG Cheng-jun¹, ZHANG Chen-yang²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring

Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300131, China)

* Corresponding author, E-mail: lixf@tju.edu.cn

Abstract: The thermal characteristics of ball screws in servo systems were analyzed, then a simplified temperature field model was established to predict the temperature distributions and variations of the ball screws quickly and accurately. The simplified model can predict the unsteady temperature rising of the ball screws, however, there are big errors when the model was used to predict the steady temperature variations of the ball screws. A new simplified model was built by introducing the factor of time modification in the simplified model. The new model has a good performance in predicting the process of steady temperature, however, there exist big errors when the new model was used to predict the unsteady temperature rising of the ball screws. Based on the performance of the two models above, a new interval model was also built and the parameters of the new interval model were identified by the LS method. The results show that the error of temperature prediction is less than 0.5℃ for different single thermal sources, and less than 0.8℃ for the double thermal sources. It concludes that the interval model built in the paper has good performance in predicting the temperature variations of ball screws.

Key words: ball screw; temperature field; interval model; parameter identification

收稿日期:2010-10-19;修订日期:2010-11-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975206)

1 引言

滚珠丝杠系统使用效率高、寿命长,被广泛应用于数控机床、坐标测量机、高精度进给平台等精密伺服系统^[1-2]。为了提高滚珠丝杠刚性,消除回程间隙,多采用丝杠预压^[3]。然而预压加剧了丝杠的发热现象,增加了丝杠温升和热形变。解决上述问题的方法一般有两种,一是误差防止,二是误差补偿^[4-7]。误差防止主要指降低热源、控制热流、使用新型材料,改进结构设计。热误差补偿则是通过检测丝杠系统关键点的温度,建立合理的数学模型,在此基础上预测丝杠的温度场与热变形,再通过补偿环节进行误差补偿。目前常用的建模方法有经验建模法(如多元回归法、神经网络法),理论建模法(如解析法、数值计算法)等。台湾高雄大学的黄世畴等^[4]建立了基于实验数据的滚珠丝杠多元回归模型;韩国浦项科技大学的 Kim 和 Cho^[5]利用有限元模型确定了丝杠上温度的分布情况;捷克技术大学的 Otakar Horejs^[6]认为轴承发热是非稳态的,用闭环有限元法分析并建立了丝杠系统模型;韩国汉阳大学的 Ahn 等^[7]利用丝杠上两点温度,基于解析法建立了自适应的实时补偿模型。华中科技大学夏军勇等^[8]研究了多个变化热源作用下,丝杠的热特性。这些学者的研究成果虽然推动了丝杠热误差建模技术的发展,但仍存在各自的缺陷。比如,线性回归法的鲁棒性、可靠性较差;有限元法的计算速度慢,实时性较差;Ahn 提出的解析法计算速度虽较有限元法快,但基于理想假设建立的解析模型不免与实际情况有所偏差,计算速度也会受到一定程度的限制。

为解决上述问题,本文在已有模型的基础上,提出了一种新的丝杠非稳态温度场模型,该模型基于导热理论和丝杠的边界条件,结合解析法、经验法,通过实测温度值来辨识丝杠与空气换热系数、导温系数等模型中的参数,较准确地预测了多个热源作用下的丝杠温度分布及变化,并具有可靠性较高的优点。

2 滚珠丝杠温度场建模

如图 1 所示,丝杠轴向长度 l 远大于其直径

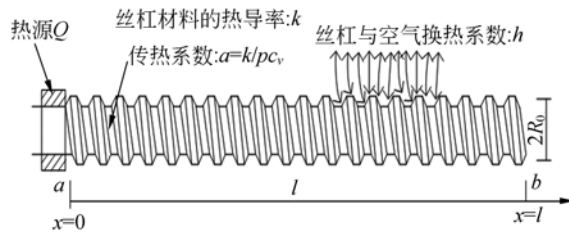


图 1 丝杠示意图

Fig. 1 Schematic diagram of lead screw

$2R_0$,为了便于研究,这里忽略径向温差,视其为只存在轴向温度梯度的一维导热体,丝杠热传导方程为^[9]

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{2h}{kR_0} \theta(x, t) - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

式中, $\theta(x, t)$ 为 t 时刻丝杠上距热源为 x 的位置点的温度变化, α 为导温系数, k 为导热率, h 为丝杠与空气换热系数。该式是基于能量守恒定律建立的,其中,第一项对应热传导能量变化,第二项对应丝杠与空气的换热关系,第三项对应丝杠内能变化。

2.1 丝杠双热源叠加性分析

丝杠的温度响应由多个热源作用产生。式(1)是线性偏微分方程,满足叠加原理^[8,10]。即多个热源同时作用下,丝杠的温度响应等效于各个单热源作用下丝杠的温度响应的线性叠加,如式(2)

$$\theta_{\text{total}}(x, t) = \sum \theta_i(x, t), \quad (2)$$

其中, $\theta_i(x, t)$ 为丝杠上第 i 个热源引起的温度响应。

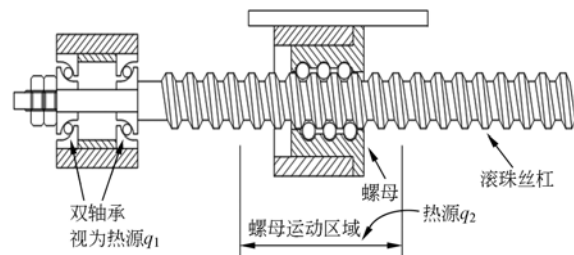


图 2 丝杠螺母系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of servo system

丝杠螺母系统如图 2 所示,可认为该系统自身包含两个发热源。其一,轴承和电机(图上未画出)可看成是热源 q_1 ,丝杠对 q_1 的温度响应为 $\theta_1(x, t)$ 。其二,螺母移动发热视为热源 q_2 ,丝杠对

q_2 的温度响应为 $\theta_2(x, t)$ 。在实际情况下,螺母在丝杠上某一段确定范围内往返规律运动,故 q_2 可以看成是一段丝杠表面的环状固定热源。根据上述论证,可得丝杠温度响应

$$\theta(x, t) = \theta_1(x, t) + \theta_2(x, t), \quad (3)$$

丝杠螺母系统可以视为双热源模型,丝杠的温度响应具有叠加性。故先对单个热源建模,再进行叠加。

2.2 单热源作用下丝杠温度场建模

研究了运动螺母区域作为单热源情况。丝杠在单热源作用下,热源两边丝杠的温度响应是对称的;而对于固定端轴承,因为它在丝杠的顶端,故对丝杠的作用本身就是单侧的,因此只需研究热源单侧丝杠的温度响应。

驱动平台按照预定路径往复运动时,丝杠螺母系统的工作状况趋于稳定,螺母和轴承发热趋于恒定。本文假定恒定功率热源固定在丝杠单端加热,热源视为边界条件,将无内热源丝杠作为研究对象。

然而,给定边值条件后,求解式(1),只能得到其形式解,无法得到明确的解析解^[9-10]。由于实际情况下温升的非稳态过程主要表现为丝杠快速升温,此时丝杠内部热传导效率远高于其与空气的换热效率,忽略式(1)中的换热项,则有

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

假设丝杠足够长,且有初始条件 $\theta(x, 0) = 0$ 和边界条件 $\theta(0, t) = \theta_m$,认为 θ_m 为固定在丝杠上的热源温度,即得忽略换热项后丝杠的温度分布^[9]为

$$\theta_R(x, t) = \theta_m \left[1 - e_i \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right], \quad (5)$$

在这里, θ_m 表示当丝杠处于稳态后各点的温度分布, $\theta_R(x, t)$ 为式(4)的解。其中, $e_i(x)$ 在数学中定义为误差函数

$$e_i(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\lambda^2} d\lambda.$$

丝杠与空气完全隔热的理想情况下,经过足够长的时间后,丝杠不同点处的温度均可以达到热源温度 θ_m 。然而实际情况中丝杠与空气存在热交换,丝杠各点的稳态温度无法达到 θ_m 。为了建立符合实际情况的丝杠温度场模型,需要考虑存在换热条件的丝杠稳态温度分布。

实际上,丝杠 x 点达到稳态时的温度值,可以用稳态热传导微分方程求解,如式(6)

$$\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} - \frac{2h}{kR_0} \theta(x, t) = 0, \quad (6)$$

得到丝杠温升稳态过程的温度分布

$$\theta(x) = C_1 e^{-\sqrt{\frac{2h}{kR_0}}x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{2h}{kR_0}}x}, \quad (7)$$

可得单热源作用下丝杠温度场模型

$$\theta^*(x, t) = (C_1 e^{-\sqrt{\frac{2h}{kR_0}}x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{2h}{kR_0}}x}) \cdot \left[1 - e_i \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right]. \quad (8)$$

实验中,丝杠起始温度为 20 °C,环境温度为 20 °C,热源温度为 35 °C,在丝杠上距离热源 0~14 cm 时,以 2 cm 间隔,等间距分布 8 个测温点,辨识该模型参数,其中距离热源分别为 0, 4, 8 cm 位置的温升理论曲线与实测曲线如图 3 所示,其余位置温度变化类似。

如图 3 所示,在非稳态温升模型建立过程中,忽略了丝杠与空气换热。其内部导热效率远高于与空气的换热效率,该模型有较好预测效果。而当温升趋于稳定时,理论曲线与实际情况偏差变大。

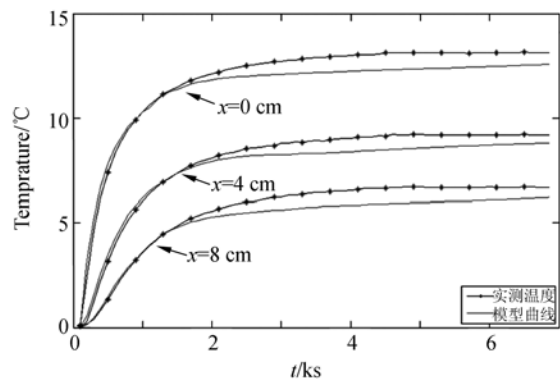


图 3 温升非稳态预测

Fig. 3 Prediction results of unsteady temperature

针对温升趋于稳定的状态,对于丝杠上某点 x 的温度,有^[11]

$$\theta^{**}(x, t) = \theta_n \left[1 - \exp \left(-\frac{2h}{\rho c R_0} \beta t \right) \right], \quad (9)$$

式(9)为经验模型,式中 β 为时间修正系数, ρ 为导热体密度, c 为丝杠比热容。丝杠导热过程,距离热源不同位置点,对于热源的响应速度存在一定差异。距离越远,响应速度越慢。为了在模型中反应这个响应的的时间差异,本文引入了时间修正系数 β 。此外, θ_n 是 x 点温升的饱和值,在本

文中,该值即为式(7)所示稳态时的温度 $\theta(x)$,因此有温升趋于稳定状态时的丝杠温度场模型

$$\theta^*(x, t) = (C_1 e^{-\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x}) \cdot \left[1 - \exp\left[-\frac{2h}{\rho c R_0} \beta \cdot t\right] \right], \quad (10)$$

实验中,丝杠起始温度为 20 °C,环境温度为 20 °C,热源温度为 35 °C,辨识 β ,得到丝杠上距离热源分别为 0, 4, 8 cm 位置处的温升理论曲线与实测曲线如图 4。

在温升非稳态过程,理论曲线与实际曲线偏差较大,而当温升趋于稳定时,该模型预测效果良好。

综上所述,可以看出,式(8)和(10)分别在丝杠温升非稳态阶段和其温度变化趋于稳定时与实际吻合。由于无法准确地用一种函数关系来描述整个温度场的变化规律,本文提出用不同的函数

$$\theta(x, t) = \begin{cases} (C_1 e^{-\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x}) \cdot \left[1 - e_t \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right] \right] & \text{(温升非稳态阶段)} \\ (C_1 e^{-\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{2h}{kk_0}}x}) \cdot \left[1 - \exp\left[-\frac{2h}{\rho c R_0} \beta \cdot t\right] \right] & \text{(温度趋于稳态阶段)} \end{cases} \quad (11)$$

以上为本文建立的丝杠温度场分段模型,丝杠温度随时间变化存在一个“分段区间”,在此分段区间之前,丝杠温升过程为非稳态阶段;之后,丝杠温度变化趋于稳定。

图 4 所示为丝杠上不同点随着时间变化的温度分布。

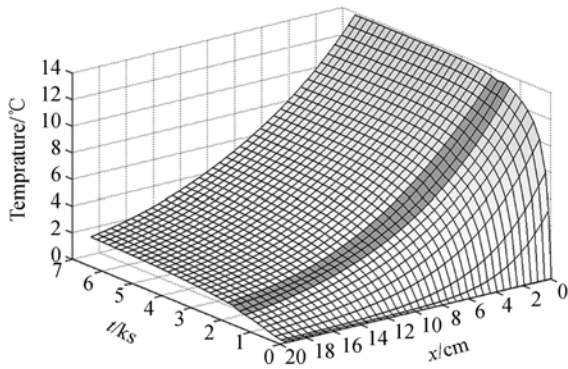


图 5 分段模型预测结果

Fig. 5 Prediction results of thermal model

为了实现上述分段建模思想,需要确定温升曲线的分段区间。分析实验数据,首先初步确定分段区间为温升曲线上升至稳态温度 70% ~

关系来分段描述整个温度场分布规律,即“分段建模”概念,来解决该理论模型在温升趋于稳态时不再适用的问题。

综合式(8)、(10)得

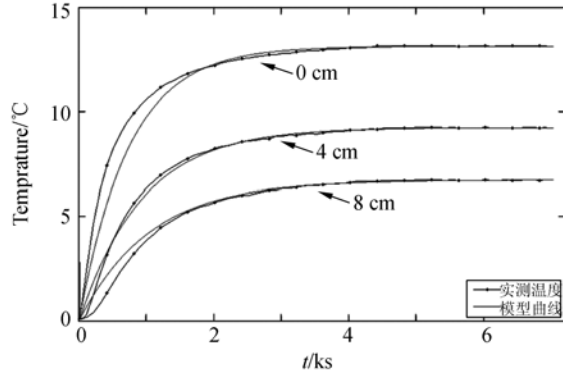


图 4 温度趋于稳态预测

Fig. 4 Prediction results of steady temperature

90%的范围,根据该区间辨识的模型参数,完成模型的初步建立。其次,为了提高模型参数的辨识精度,将上述分段区间进一步划分为 N 个间距 120 s 的区间。在第 i 个区间内相同的时间点,分别对上述两种模型预测的温升曲线进行取样 θ_{ij}^* , θ_{ij}^{**} ($i=1, \dots, N$; $j=1, \dots, 12$), 取样间隔为 10 s。计算每个区间的 $E(i)$, 如式(12)

$$E(i) = \sum_{j=1}^{12} (\theta_{ij}^* - \theta_{ij}^{**})^2. \quad (12)$$

$E(i)$ 值最小的区间即为最终的分段区间。

3 模型参数辨识

换热系数 h 是一个近似的经验值,并非严格为常数,且与实际丝杠温度、环境温度相关,因此需对其进行辨识,以达到最佳预测效果;导热系数 α 由丝杠的热导率和比热容确定,温升非稳态过程建模,主要考虑丝杠内部的热传导,并假设丝杠足够长,为了达到更贴近实际的预测效果,需要根据实际情况对模型中的 α 进行辨识;为反映丝杠上不同点对于热源的响应速度存在的差异,引入的时间修正系数 β 需根据稳态的温度分布来辨识。

式(11)参数的辨识,需要确定分段区间,建立完整的温度场分段模型。因此,先通过实验数据的划分,初步辨识 α, β 的值,确定分段区间。建立完整的模型后,根据分段区间确定的丝杠非稳态温度采样值和丝杠趋于稳态温度采样值精确辨识模型参数 α, β 。

在丝杠上距离热源 $0 \sim 14$ cm 处,以 2 cm 间隔,等间距分布 8 个测温点,实时采集丝杠上 8 个点的温度值。根据采集所得数据,对模型辨识过程如下。

3.1 辨识参数 C_1, C_2 及 h

根据式(7),利用所得 8 个不同位置的稳态温度值,建立方程组,辨识得到 $h = 17.2$ W/($\text{m}^2 \cdot \text{C}$), $C_1 = 13.1, C_2 = 0$ 。

3.2 初步确定分段区间,完成模型建立

设丝杠上某点温度上升至稳态值 70% 的时刻为 $t_{0.7}$, 90% 的时刻为 $t_{0.9}$ 。以 $[t_{0.7}, t_{0.9}]$ 时间段对应的一段温度曲线为分段区间,式(11)所示为完成的模型。

3.3 初步辨识参数 α, β

根据式(8),采用实验中 $[t_0, t_{0.9}]$ 时间段内记录的温度值,辨识导温系数 α 值。根据式(10),采用实验中 $[t_{0.7}, t_{\infty}]$ 时间段内记录的温度值,辨识导温系数 β 值。

3.4 精确确定分段区间

根据式(12)和初步辨识参数 $C_1, C_2, h, \alpha, \beta$, 精确确定温升曲线上的分段区间。

3.5 精确辨识模型参数 α, β

根据分段区间所确定的丝杠非稳态温度采样值精确辨识参数 α , 结果如表 1, 取其平均值为 $1.04 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。根据丝杠温度趋于稳态时的采样值精确辨识 β , 结果如表 2, 近似为线性, 拟合为 $\beta = -5.23x + 1.90$ 。

3.6 C_1, C_2 调整

上述参数辨识完成后,当每次变换热源时,需在丝杠温度场预测之初,调整 C_1, C_2 的值。温度快速上升某一时刻,取两个或多个测温点的实时温度值,结合 h, α, β 的辨识结果,代入式(11)温升非稳态阶段,利用最小二乘原理,得 C_1, C_2 的值。调整参数后的模型在实验条件没有剧烈变化的前提下,可以较好地预测丝杠温度场的变化和分布。

表 1 α 值辨识结果

x/m	$\alpha/10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
0	0.92
0.02	1.00
0.04	0.97
0.06	1.03
0.08	1.06
0.10	1.08
0.12	1.11
0.14	1.15
平均值	1.04

表 2 β 值辨识结果

x/m	β
0	1.98
0.02	1.75
0.04	1.62
0.06	1.60
0.08	1.50
0.10	1.38
0.12	1.25
0.14	1.2
拟合	$\beta = -5.23x + 1.90$

4 实 验

4.1 单热源实验

实验平台如图 6 所示。丝杠起始温度为 20 $^{\circ}\text{C}$, 环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 监测丝杠上距离热源 $0 \sim 14$ cm 处, 以 2 cm 间隔, 等间距分布的 8 个测温点。使用 PT100 热敏电阻, 结合温度变送器和 NI6251 采集卡实现各点温度值的实时采集。

为了验证该模型在不同单热源加热丝杠的条件下预测的丝杠温度场的鲁棒性和精确性, 利用 3 个功率不同热源 A, B, C, 设计 3 组单端加热丝杠的实验。

热源 A, B, C 加热丝杠时, 紧邻热源处的丝杠温度分别为 $36, 34, 31.5$ $^{\circ}\text{C}$ 。通过模型预测丝杠

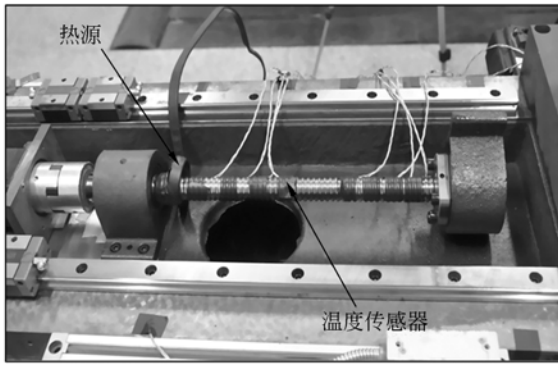


图 6 丝杠升温实验图

Fig. 6 Equipment of experiment

上距离热源 2,6,10,14 cm 4 个点的温度值,与实测温度比较,结果如图 7 所示,其中光滑曲线为理论曲线。

实验结果显示,当热源不同时,该模型通过调整辨识参数,可在不同位置处得到较好的温度响应预测效果。在温升趋于平缓时,分段模型通过分段区间实现联结,联结效果平滑、良好。预测结果与实际温度最大误差值为 0.5 °C,认为该误差是可以接受的。

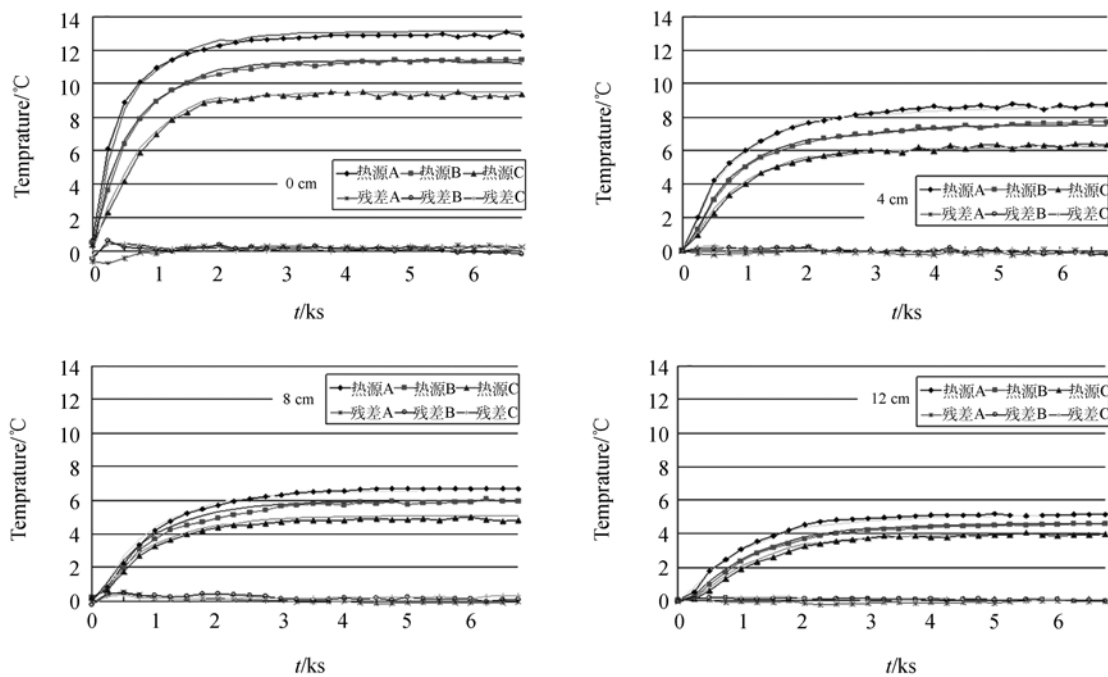


图 7 $x=0,4,8,12$ cm 点温升曲线

Fig. 7 Temperature rising curves of four points in $x=2, 6, 10, 14$ cm

4.2 双热源实验

由上文分析可知,丝杠螺母传动机构工作时有两个热源 q_1, q_2 ,此时丝杠的温度响应可近似为对 q_1, q_2 温度响应的线性叠加。

为了验证该模型在双热源同时加热丝杠的条件下预测丝杠温度的鲁棒性和精确性,设计了如图 8 所示的实验,热源 q_1 模拟轴承发热;热源 q_2 模拟螺母发热。控制室温为 20 °C,采集左端距离热源 2,5,8,11 cm 4 点的温度值。根据模型,计算丝杠对 q_1 和 q_2 各自的温度响应,再将二者叠加,得到丝杠左端距离热源 2,5,8,11 cm 4 点的

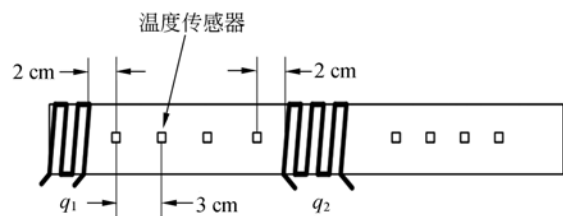


图 8 双热源实验简化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of two heat source experiment

温度值,与实测值比较结果,如图 9。

从双热源实验结果可以看出,双热源预测整

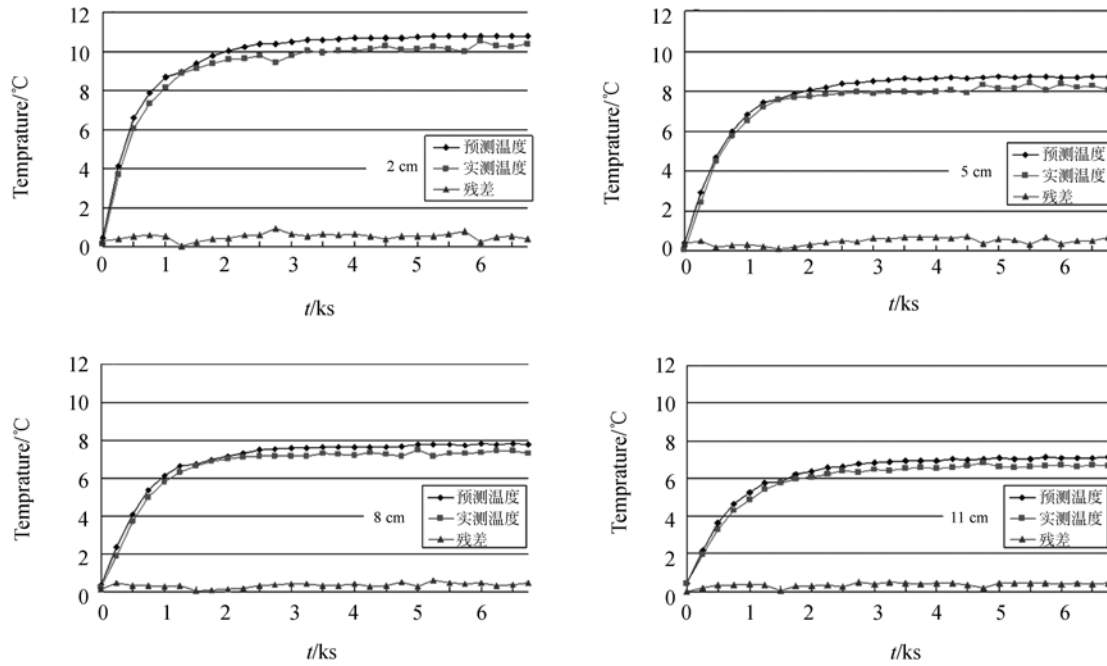


图 9 丝杠左端 x 轴上四点各点温升预测值与实测值
Fig. 9 Temperature rising curves of four points in x axis

个温度变化过程,效果不如单热源作用,这主要是由于双热源叠加模型做了线性简化造成的。

双热源实验中预测值与实测值最大误差为 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该实验模拟了实际情况丝杠螺母传动机构工作发热状态,说明在丝杠螺母传动机构工作时,可用此模型较好地预测丝杠上各点的实际温升过程。

5 结 论

本文分析了伺服系统中的丝杠螺母热特性规律,以一维简化方法求解了温度场的解析解;分析了丝杠上轴承和螺母两个发热源及其温度响应可叠加性;提出了一种新型基于理论和经验建模的丝杠温度场模型。该模型基于导热理论和丝杠实

际的边界条件,结合解析法和经验法,利用最小二乘原理辨识模型中 $C_1, C_2, h, \alpha, \beta$ 。该实验辨识过程通过粗辨识和精确辨识两次迭代完成,在本文设计的实验中保证了辨识精度。但对其在工程实际中的应用,还需要进一步研究。

本文在不同热源条件下进行了单热源实验和模拟丝杠螺母实际工作情况的双热源实验。实验证明了该模型的可靠性与精确性,取得了良好的温度预测效果。实验结果表明:该模型在不同单热源实验条件下,预测温升值与实测值的最大误差在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,双热源实验最大误差值在 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。该模型建立时将热传导方程分成非稳态温升过程和温度趋于稳定过程两步求解,虽有一定近似,但经模型修正、参数辨识后,实验证明此模型具有良好的可靠性和鲁棒性。

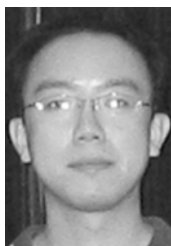
参考文献:

[1] 戴蓉, 谢铁邦. 新型一维位移工作台的设计及特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 428-433.
DAI R, XIE T B. Design and analysis of 1-DOF nano-positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 428-433. (in Chinese)
[2] 卢礼华, 郭永丰, 下河边明. 高增益 PID 控制器实

现纳米定位 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 63-68.
LU L H, GUO Y F, TACHIKAWA, *et al.*. High-gain PID controller for nanometer positioning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 63-68. (in Chinese)
[3] 向红标, 裘祖荣, 李醒飞, 等. 精密实验平台的非线性摩擦建模与补偿 [J]. 光学精密工程, 2010, 18

- (5):1119-1127.
- XIANG H B, QIU Z R, LI X F, *et al.*. Nonlinear friction modeling and compensation of high-precision experimental platforms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(5):1119-1127. (in Chinese)
- [4] Huang Shyh Chour. Analysis of a model to forecast thermal deformation of ball screw feed drive systems [J]. *Int. J. Math. Tools Manufact.*, 1995, 35(8):6.
- [5] KIM S K, CHO D W. Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system [J]. *Int. J. Math. Tools Manufact.*, 1997, 37(4):14.
- [6] HOREJS O. Thermo-mechanical model of ball screw with non-steady heat sources. [C]. 2007:133-137.
- [7] AHN J, CHUNG S. Real-time estimation of the temperature distribution and expansion of a ball screw system using an observer [C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218(12):1667-1681.
- [8] 夏军勇, 吴波, 胡友民, 等. 多变化热源下的滚珠丝杠热动态特性 [J]. *中国机械工程*, 2008, 19(8): 955-958.
- XIA J Y, WU B, HU Y M, *et al.*. The Thermal Dynamic Characteristic of Ball-screw under the variational multi-thermal Source [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2008, 19(18): 955-958. (in Chinese)
- [9] 严宗达, 王洪礼. 热应力 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- YAN Z D, WANG H L. *Thermal Stress* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. (in Chinese)
- [10] 俞昌铭. 热传导及其数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1981.
- YU CH M. *Thermal Conduction and its Numerical Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1981. (in Chinese)
- [11] 程光仁, 施祖康, 张超鹏. 滚珠螺旋传动设计基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- CHENG G R, SHI Z K, ZHANG CH P. *The Design of Ball Helical Transmission* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)

作者简介:



陈 诚(1980—),男,甘肃兰州人,博士研究生,2004年、2007年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事误差补偿以及精密测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: chen Cheng@tju.edu.cn



董成军(1986—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事误差补偿以及精密测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: dcj_tju@tju.edu.cn

导师简介



裘祖荣(1958—),男,上海人,教授,博士生导师,曾赴英国 Kingston 大学和新加坡 Gintic 制造技术研究院从事国际合作项目研究,主要从事传感及测量信息技术、精密测试技术及智能仪器、环境检测技术及仪器等方面的研究。E-mail: qzr@tju.edu.cn



李醒飞(1966—),男,湖北天门人,教授,博士生导师,2000年于天津大学获得博士学位,2003年赴美国密歇根大学学习和工作,主要从事多传感器融合技术、测试计量技术及仪器等方面的研究。E-mail: lixf@tju.edu.cn



张晨阳(1967—),男,江苏睢宁人,博士,教授,硕士生导师,2001年于日本国立佐贺大学研究生院工学系研究科获博士学位,主要从事摩擦、磨损、润滑、光电超声检测、基于生物机理的智能系统和微系统等方面的研究。E-mail: chen yang0330@126.com