

文章编号:1000-582X(2011)03-013-05

数控滚齿机热变形误差分析与补偿新方法

王时龙, 祁鹏, 周杰, 杨勇, 李川, 康玲

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了对数控滚齿机的热变形误差进行补偿, 提高齿轮加工精度, 利用聚类回归分析方法, 优化选择了热误差补偿过程中的温度测量点。采用最小二乘回归方法建立了热误差模型, 实验结果验证, 该模型精度高。提出了一种热误差差动螺旋补偿方法, 该方法完全采用外部硬件补偿, 能够独立地实现对热变形误差的实时补偿。与其他补偿方法对比, 该方法不受限于数控系统的开放性, 通用性较强。

关键词: 滚齿机; 误差补偿; 聚类分析; 差动螺旋结构

中图分类号: TH 161

文献标志码: A

Thermal deformation error analysis and a novel compensation method for NC gear hobbing machine tools

WANG Shi-long, QI Peng, ZHOU Jie, YANG Yong, LI Chuan, KANG Ling

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To compensate the thermal deformation error of NC (numerical control) gear hobbing machine tools and improve the accuracy of gear machining, based on the clustering regression analysis theory, temperature measurement points are optimized to compensate thermal error. Accordingly a thermal model is set up by using least squares theory, and experimental result shows that the model is very accurate. A thermal error differential helix compensation scheme is proposed, which adopts direct compensation outside completely and can achieve real-time compensation for thermal error independently. Compared with other compensation methods, this one is unlimited to the openness of NC system and has a great popularity.

Key words: gear hobbing machine tools; error compensation; cluster analysis; differential helix

齿轮是工业生产中的重要基础零件, 齿轮工业已经成为中国机械基础件中规模最大的行业, 而齿轮加工机床的精度对齿轮的精度有着决定性的作用。滚齿机在长时间工作中, 会产生大量的热量, 机床受热变形后对齿轮的加工精度有着很大的负面影响^[1-3]。随着滚齿机切削速度和切削功率的提高, 由

热变形引起的误差更是占到了滚齿机总误差的70%左右^[4-6]。因此, 机床热致误差的问题越来越受到世界各国的广泛关注。根据目前机床热误差研究成果, 减小机床热误差有两种基本方法^[7-8]: 误差预防法和误差补偿法。误差预防法是通过改进结构设计和制造途径消除或减少可能的热误差源, 提高机

收稿日期: 2010-10-20

基金项目: 国家科技重大专项课题资助项目(2009ZX04001-081, 2009ZX04011-041); 国家杰出青年科学基金资助项目(50925518); 机械传动国家重点实验室自主课题

作者简介: 王时龙(1966-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事计算机及集成制造、数控技术与装备自动化等领域的研究, (E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

床的制造精度,或者控制温度来满足加工精度的要求,这种方法经济代价往往很大而且效果并不十分理想。误差补偿法^[9]是采用各种检测手段对数控加工时产生的误差进行直接或间接的测量,从而建立热误差模型,对机床实施误差补偿。

Kim等^[10]运用有限元方法建立了机床滚珠丝杠系统的温度场模型,德国柏林工业大学借助有限元计算机床部件及整机的温度场建立变形场模型^[11],这些研究对机床热误差补偿提供了有益的尝试。但在补偿过程中主要都是软补偿,即通过修改数控指令或数控系统本身来获得补偿。这些补偿方法的有效性和实时性受限于数控系统的开放,如果采用外部直接硬件补偿则可以摆脱对已有系统的依赖。

笔者在分析某滚齿机的主要热源的基础上,利用聚类回归分析方法的基本原理,对各个温度变量及位移变量进行了相关性分析,从20个热源中优化选择了6个作为温度变量的测量点,并将这6个温度测量点用于最小二乘法回归建模。最后提出了一种热误差差动螺旋补偿方法。这种补偿方法不需要修改数控指令及数控系统本身,完全采用外部硬件补偿,实时性好,精度高。

1 热源分析

为了补偿滚齿机热变形,须先弄清楚机床热源,归纳起来,滚齿机床热量来源主要有以下4个方面^[12-13]:

1) 电机产生的热。六轴数控滚齿机各轴电机所作的功,最终都转化成熟,这些热一部分散发到空气中,而大部分都传入机床与工件中,是引起机床内部温度变化的主要因素。

2) 轴承、导轨及油封等零件间摩擦产生的热。机床上导轨的运动件和承导件间、轴承中的运动件和承导件间、液体内部都会有摩擦,尤其是轴与油封间的摩擦能产生大量的热。

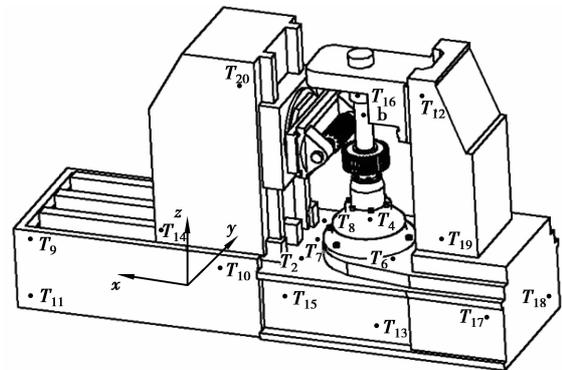
3) 冷却液将切削热及铁屑通过喷淋的方式传递给机床床身,其中滚刀主轴、工件主轴离切削点最近,受热最多,热变形最明显。

4) 工作台下面的一对双蜗轮蜗杆副的回转装置在工作状态下的摩擦发热是工作台发生热变形的主要原因。

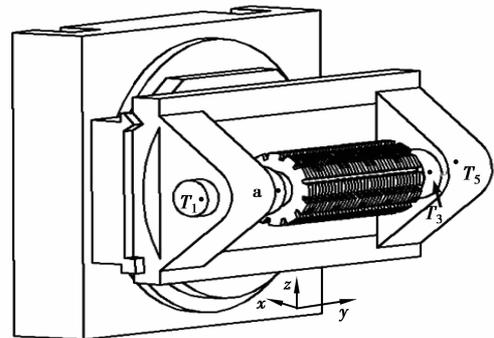
2 温度测量点的选择与优化

为了尽量全面地掌握某型号滚齿机加工状态下的温度场,在该滚齿机上主要受热部位布置了20个温度传感器,令为 T_1, T_2, \dots, T_{20} 。因为对齿轮加工精度影响最大的是径向误差,因此这里只考虑径

向误差(x 方向)。为了测量热变形误差,在滚刀主轴径向和工件主轴径向分别布置了2个光栅式位移传感器a、b,其反映的位移量分别记为 X_1, X_2 ,在滚齿机上的安装位置如图1所示。



(a) 20个温度传感器及2个位移传感器的总体布置图



(b) 滚刀架局部放大图



(c) 位移传感器a工作过程的实测照片

图1 传感器在滚齿机上的布置图

由于滚齿机床身上各热源的交互作用,在热误差模型中可能会出现变量耦合,从而降低机床热误差模型的精确性和鲁棒性,而且过多的温度传感器布线也对齿轮的加工构成障碍。因此,为了得到比较精确且鲁棒性好的热误差模型,笔者对所布置的温度变量进行了分类优选。根据聚类分析基本原理^[14],将各温度变量与位移变量作相关性分析,把两个或几个温度变量与位移变量之间相关系数接近的分为一类,再从每一类中选取一个相关系数最大的温度变量作为该类的代表,最后将选出来的每类温度变量代表组成一个温度变量组用于滚齿机的热

变形误差多元线性回归——最小二乘法建模。

各测量温度变量间相关系数值的计算式为

$$r_{TT} = \frac{\sum (T_i - \bar{T})(T_j - \bar{T})}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum (T_j - \bar{T})^2}}, \quad (1)$$

式中: r_{TT} 为各温度变量间相关系数值; T 为温度变量, $^{\circ}\text{C}$; i, j 为变量的样本号, $i = 1, 2, \dots, n, j = n - 1$ 且 $i \neq j$; \bar{T} 为平均温度, $^{\circ}\text{C}$, $\bar{T} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n T_i)$ 。

测量温度与热变形位移量间相关系数值的计算式为

$$r_{TX} = \frac{\sum (T_i - \bar{T})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}}, \quad (2)$$

式中: r_{TX} 为温度变量与热变形位移变量相关系数值; X 为热变形位移变量, μm ; \bar{X} 为热变形位移变量平均值, μm , $\bar{X} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)$ 。

根据上述方法, 得出各温度测量点与热变形位移量 X_1 的相关系数如表 1 所示。

表 1 温度变量与热变形变量 X_1 的相关系数 r_{TX_1}

T_i	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
r_{TX_1}	0.85	0.73	0.69	0.66	0.55	0.48	0.82
T_i	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}
r_{TX_1}	0.76	0.59	0.44	0.72	0.80	0.74	0.67
T_i	T_{15}	T_{16}	T_{17}	T_{18}	T_{19}	T_{20}	
r_{TX_1}	0.81	0.68	0.78	0.44	0.56	0.47	

将各温度变量按相关系数接近的分为以下 6 组: $\{T_1, T_7, T_{15}\}$, $\{T_3, T_4, T_{14}, T_{16}\}$, $\{T_5, T_9, T_{19}\}$, $\{T_6, T_{10}, T_{18}, T_{20}\}$, $\{T_8, T_{12}, T_{17}\}$, $\{T_2, T_{11}, T_{13}\}$, 再从各组中选出相关系数最大的为该组的代表, 最后得到用于滚刀主轴径向误差 X_1 建模的温度变量有: T_1 (滚刀主轴端部), T_3 (滚刀主轴轴承), T_5 (滚刀箱), T_{10} (大立柱导轨), T_{12} (小立柱导轨), T_{13} (冷却液); 同理用于工件主轴径向误差 X_2 的温度变量有: T_3, T_4 (回转工作台), T_6 (工作台台面中央), T_{12}, T_{13}, T_{16} (工件夹具处)。

3 热误差模型的建立

采用聚类分析方法完成温度变量优选后, 运用多元线性回归——最小二乘法建立机床热变形误差与温度的补偿模型。多元线性回归建模法是利用统计方法建立多输入与单输出关系的模型。针对数控

滚齿机的热变形情况, 可得到一组表达多个测量温度输入和一个方向上位移输出关系的线性关系。最小二乘法结构简单、性能可靠、逼近精度较高, 是热变形位移建模领域最为行之有效的建模方法。位移变量 X_i 与优选的 p 个温度自变量 T_1, T_2, \dots, T_p 的内在联系是线性的, 通过实验得到 k 组观测数据: $T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kp}$ ($k = 1, 2, \dots, m$, 其中 m 为自然数), 有如下线性方程组

$$\left. \begin{aligned} X_{1i} &= A_0 + A_1 T_{11} + A_2 T_{12} + \dots + A_p T_{1p} + \epsilon_1, \\ X_{2i} &= A_0 + A_1 T_{21} + A_2 T_{22} + \dots + A_p T_{2p} + \epsilon_2, \\ &\vdots \\ X_{ki} &= A_0 + A_1 T_{k1} + A_2 T_{k2} + \dots + A_p T_{kp} + \epsilon_k. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由上述方程组可得到滚齿机的热变形位移与温度变量的多元线性回归数学模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{TA} + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{1i} \\ X_{2i} \\ \vdots \\ X_{ki} \end{bmatrix}; \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1p} \\ 1 & T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & T_{k1} & T_{k2} & \dots & T_{kp} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ \vdots \\ A_p \end{bmatrix}; \boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_k \end{bmatrix}.$$

根据多元线性回归与最小二乘法原理, 可估计参数 A , 设 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 分别是参数 $A_0, A_1, A_2, \dots, A_p$ 的最小二乘估计, 则回归方程式可转化为

$$X_i = a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2 + \dots + a_p T_p. \quad (5)$$

由最小二乘法原理知道, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 应使得全部观测值 X_{ki} 的残差平方和达到最小, 即

$$X_{ki} = \min W^2, \quad (6)$$

式中 $W^2 = \sum_{k=1}^m (X_k - \hat{X}_k)^2 = \sum_{k=1}^m (X_k - a_0 - a_1 T_{k1} - a_2 T_{k2} - \dots - a_p T_{kp})^2$ 。由于 W^2 是 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 的非负二次式, 所以最小值一定存在。根据微分学的极值定理, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 应是下列方程的解:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W^2}{\partial a_0} &= -2 \sum_{k=1}^m (X_{ki} - a_0 - a_1 T_{k1} - a_2 T_{k2} - \dots - a_m T_{kp}) = 0, \\ \frac{\partial W^2}{\partial a_1} &= -2 \sum_{k=1}^m (X_{ki} - a_0 - a_1 T_{k1} - a_2 T_{k2} - \dots - a_m T_{kp}) T_{k1} = 0, \\ &\vdots \\ \frac{\partial W^2}{\partial a_p} &= -2 \sum_{k=1}^m (X_{ki} - a_0 - a_1 T_{k1} - a_2 T_{k2} - \dots - a_m T_{kp}) T_{kp} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7)和实验测量的 k 组滚齿机滚刀主轴或被加工工件主轴 X 向的热变形位移与温度变量数据可以计算出回归参数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 的值, 将 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_p$ 的值代入回归方程(4), 从而得到滚齿机滚刀主轴与工件主轴径向的热变形误差与温度间的补偿模型方程如下:

$$X_1 = -0.2565 + 0.0189T_1 - 0.0124T_3 + 0.0082T_5 - 0.0074T_{10} + 0.0206T_{12} - 0.0058T_{13}, \quad (8)$$

$$X_2 = -0.1493 - 6.2945T_3 + 7.7619T_4 - 4.0562T_6 + 4.1436T_{12} - 4.0343T_{13} + 5.1798T_{16}. \quad (9)$$

图2示出了对滚刀主轴径向误差的实测值、模型逼近值和残差值曲线。由图可见, 该误差模型性能可靠, 逼近精度高。

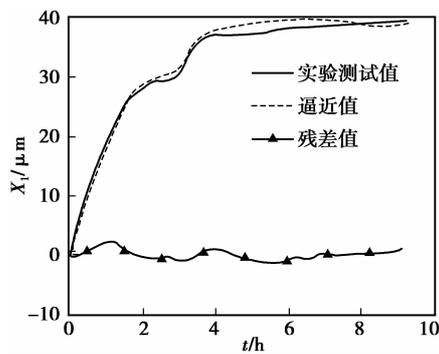


图2 实验检测结果

4 热误差补偿方法

为了检验所建立的误差模型能够对热变形进行补偿, 笔者提出了一种补偿方法, 如图3所示。

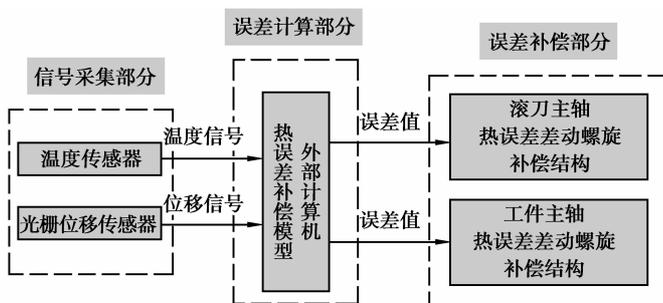
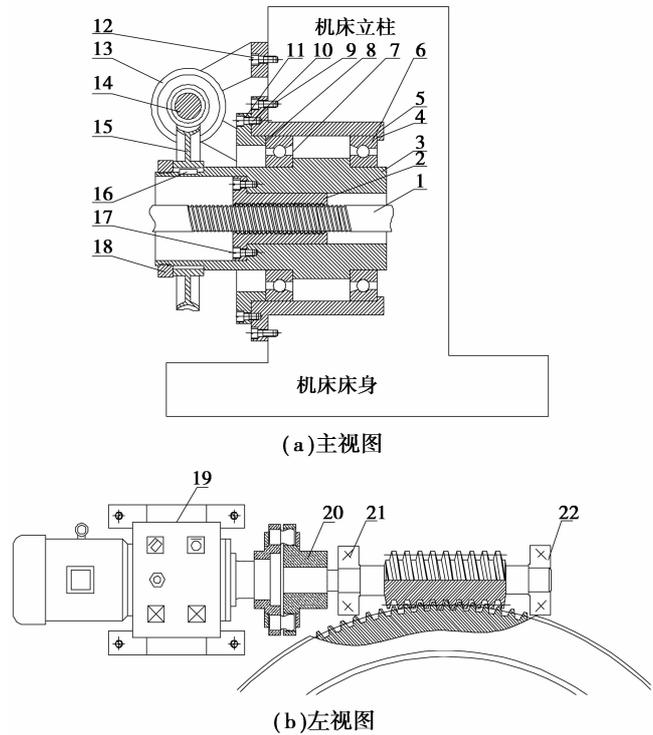


图3 热误差补偿系统结构示意图

图3中所采用的补偿系统是一种自行研发的热误差硬补偿结构, 即差动螺旋补偿结构, 该结构已申请国家发明专利^[15] (申请号: 200910250884.5), 其

基本结构如图4所示。



1—丝杠; 2—螺母; 3、5、11—套筒; 4、8—垫圈; 6、7、21、22—轴承; 9、10、12、17—螺钉; 13—减速器机座; 14—蜗杆; 15—蜗轮; 16—平键; 18—紧固螺母; 19—电机直联型减速器; 20—联轴器

图4 热误差差动螺旋补偿装置

热误差差动螺旋补偿结构的工作原理是: 当数控系统发出指令, 系统控制的伺服电机驱动滚珠丝杠螺母实现机床进给运动时, 由电机直联型减速器及蜗轮蜗杆组成的热误差补偿系统随机床一起运动, 其中蜗轮蜗杆处于自锁状态; 当把间接或直接检测出的机床热变形信息通过所建立的模型得出需要补偿的误差值后, 补偿系统的伺服电机控制蜗杆转动带动丝杠螺母转动从而推动机床立柱移动, 实现实时的热误差补偿, 此时丝杠处于制动状态。

该装置结构紧凑, 传动平稳、高效, 补偿精度高, 可广泛用于数控机床上, 随着机床各部件温度逐渐升高, 在不影响机床整体特性及不改变数控程序的基础上, 独立地实现对热变形误差的实时补偿(限于篇幅, 实验验证过程另文报道)。

5 结论

1) 针对大型数控滚齿机的热致误差问题, 以某型号滚齿机为对象, 采用聚类分析方法优化选择了6个产生热误差的温度测量点, 其相关系数均为同

类分组中最高,不仅避免了温度信息的丢失,同时还提高了模型的精度。

2)根据实测的温度与位移变化数据,采用多元线性最小二乘回归方法建立了某型号滚齿机的热误差模型。实验验证,所建立的模型精度较高。

3)结合所建立的模型提出了一种热误差差动螺旋补偿方法,该方法完全采用外部硬件补偿,实时性好,有助于提高齿轮加工精度。

4)所建立的模型针对的是某一具体型号滚齿机,即模型本身的通用性有待提高。

参考文献:

- [1] WANG H, HUANG Q, YANG H. In-line statistical monitoring of machine tool thermal error through latent variable modeling [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2006, 25(4): 279-292.
- [2] KANG Y, CHANG C W, HUANG Y, et al. Modification of a neural network utilizing hybrid filters for the compensation of thermal deformation in machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 376-387.
- [3] MIN X, JIANG S Y, CAI Y. An improved thermal model for machine tool bearings [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(1): 53-62.
- [4] WU H, ZHANG H T, GUO Q J, et al. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 207(1/3): 172-179.
- [5] ZHAO H T, YANG J G, SHEN J H. Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(6): 1003-1010.
- [6] DONMEZ M A, HAHN M H, SOONS J A. A novel cooling system to reduce thermally-induced errors of machine tools [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 521-524.
- [7] 鲁远栋. 数控机床热误差检测及补偿技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [8] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools: a review, part II, thermal errors [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40: 1257-1284.
- [9] 杨建国, 张宏韬, 童恒超, 等. 数控机床热误差实时补偿应用[J]. *上海交通大学学报*, 2005, 39(9): 1389-1392. YANG JIAN-GUO, ZHANG HONG-TAO, TONG HENG-CHAO, et al. The application of real-time thermal error compensation on NC machine tools [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(9): 1389-1392.
- [10] KIM S K, CHO D W. Real time estimation of temperature distribution in a ball-screw system [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, 37(4): 451-464.
- [11] 国家自然科学基金委员会. 机械制造科学(冷加工)[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- [12] 唐开勇. 热变形对机床的影响与控制[J]. *机械*, 2006, 33(2): 20-23. TANG KAI-YONG. To forestall and control thermal deformation of machine tools [J]. *Machinery*, 2006, 33(2): 20-23.
- [13] 赵强, 刘素明, 张令, 等. 机床热变形产生机理及控制措施[J]. *煤矿机械*, 2008, 29(1): 160-161. ZHAO QIANG, LIU SU-MING, ZHANG LING, et al. Mechanism and controlling measures for thermal deformation of machine tool [J]. *Coal Mine Machinery*, 2008, 29(1): 160-161.
- [14] 郭秀娟, 袁月, 范小鸥. 模糊聚类算法分析与应用[J]. *吉林建筑工程学院学报*, 2009, 26(4): 79-81. GUO XIU-JUAN, YUAN YUE, FAN XIAO-OU. Analysis and application of fuzzy clustering algorithm [J]. *Journal of Jilin Institute Architectural & Civil*, 2009, 26(4): 79-81.
- [15] 王时龙, 祁鹏, 周杰, 等. 一种热误差差动螺旋补偿装置及其使用方法: 中国, 200910250884. 5 [P]. 2010-08-04.

(编辑 张 苹)