

机床床身模拟件的弯曲刚度对其热态几何精度影响规律的应用研究

闫占辉¹, 于骏², 曾福胜², 曹毅³

- (1. 长春工程学院 机械系, 吉林 长春 130012;
2. 吉林大学 机械学院, 吉林 长春 130025;
3. 吉林省机电研究设计院, 吉林 长春 130012)

摘要: 针对弯曲刚度大小不等的两种床身模拟件, 采用与环境温度变化或摩擦热作用相似的热源对其进行热态模拟, 讨论了在稳定热源下的三维传热特性。并利用有限元程序计算出同一热源在放出热能不同情况下模拟件的温度场分布。与实验测得的温度场对比结果表明, 二者基本吻合。热变形实验结果表明, 在相同的温差情况下, 刚度较小的床身模拟件的热态几何精度明显优于刚度较大的床身模拟件的热态几何精度。因而, 从改善机床床身的结构出发, 本文创造性地提出的通过适当降低床身模拟件的弯曲刚度, 并解除其它部件对床身模拟件变形的束缚, 使其床身模拟件的重力变形能自动地补偿环境温度变化或床身与工作台之间摩擦等热源引起的热变形的这一原理。该原理为基本消除大型精密机床的热变形提供了一种新方法。

关键词: 机床; 床身模拟件; 弯曲刚度; 热态几何精度; 热变形

中图分类号: TG502. 15 **文献标识码:** A

1 引言

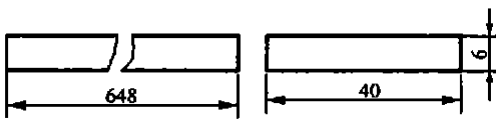
随着精密、超精密加工技术的发展, 对高精度加工机床的需求与日俱增。在加工过程中, 大型精密机床自身的热变形对机床加工精度的影响尤为显著^[1]。目前对热源的测量、数据处理及模拟技术相对成熟^[2,3]。而对机床热变形控制的研究, 近年来国内外主要集中在: (1) 采用热容量大、尺寸稳定性好的新型结构材料, 如采用人造花岗岩材料做三坐标测量机的机座。(2) 采用经验模型、数值模型或神经网络模型等方法优化测温传感器的位置, 进行机床热位移的主动实时补偿^[4,5]。前一种方法由于材料的脆性、韧性较差而难以普遍推广应用; 后一种补偿措施由于大都需采用附加补偿装置, 且补偿效果常常不甚理想, 目前还主要处于理论研究阶段。

从改善机床床身的结构出发, 本文创造性地提出通过适当降低床身的弯曲刚度, 并解除其它部件对床身变形的束缚, 使其床身的重力变形能

自动地补偿环境温度变化或床身与工作台之间摩擦等引起的热变形。采用这一思想设计的新型自准直导轨磨床与常规导轨磨床相比, 其精度稳定性好、导轨直线度高^[6]。所以, 本文对两种不同弯曲刚度的床身模拟件在稳定热源下的三维传热特性进行了有限元分析及实验对比研究, 并得出了相应的结论。

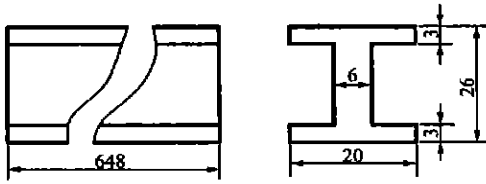
2 床身模拟件

床身是大型精密机床的重要基础件, 它的热态特性直接影响机床的加工精度及精度稳定性。为了说明床身的弯曲刚度与其热态几何精度的关系, 本文将弯曲刚度相对较小的柔性床身模拟件(图 1a)与弯曲刚度相对较大的刚性床身模拟件(图 1b)进行对比研究。二者材料相同, 均为 45[#] 钢, 它们的横截面积和长度也都相等, 由计算知, 图 1a 所示柔性床身模拟件的纵向弯曲刚度与图 1b 所示刚性床身模拟件纵向弯曲刚度之比约为 1: 27. 72。



(a) 柔性床身模拟件

(a) Flexible simulating parts of machine beds.



(b) 刚性床身模拟件

(b) Rigid simulating parts of machine beds.

图 1 床身模拟件

Fig. 1 Simulating parts of machine beds.

由图 2 的实验装置可知, 床身模拟件在热平衡后为无内热源、各向同性的三维稳定热传导问题, 其导热微分方程为^[7]

$$\Delta^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$



1. Heater 2. Heat - insulating support 3. Junction box of transformer 4. Heat- insulating plate 5. Simulating part of machine bed 6. Table of milling machine

图 2 实验装置图

Fig. 2 Sketch of the experimental equipment.

其边界条件为

- 1) - $\lambda \frac{\partial t}{\partial n} |_{s_2 \sim s_6} = \alpha_s (t - t_f)$ (第三类边界条件)
- 2) - $\lambda \frac{\partial t}{\partial n} |_{s_1} = q$ (第二类边界条件)

其中 Δ 为三维拉普拉斯算子, λ 为床身模拟件的导热系数, α_s 为床身模拟件的对流系数, t_f 为环境的温度。设 S 是问题区域 G 的边界, S_1 为床身模拟件的被加热表面(上表面), $S_2 \sim S_6$ 为床身模拟件的其它五个放热表面。

为便于求出(1)式在上述边界条件下的欧拉

方程, 先设边界条件为 $t|_s = 0$ 的情况, 将 $\Delta^2 t$ 乘以 t , 在区域 G 上求积分, 得

$$J_1[t] = \iiint_G t \Delta^2 t dG$$

利用 Gauss 公式

$$\begin{aligned} & \iiint_G \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dG \\ &= \iint_S [P \cos(n, x) + Q \cos(n, y) + R \cos(n, z)] ds \end{aligned}$$

并设 $P = \frac{\partial t}{\partial x}$, $Q = \frac{\partial t}{\partial y}$, $R = \frac{\partial t}{\partial z}$, 得

$$\begin{aligned} \iiint_G \frac{\partial t}{\partial n} ds &= \iint_S \left[\frac{\partial t}{\partial x} \cos(n, x) + \frac{\partial t}{\partial y} \cos(n, y) + \frac{\partial t}{\partial z} \cos(n, z) \right] ds \\ &= \iiint_G \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 \right] dG \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \iint_S t \frac{\partial t}{\partial n} ds \\ &= \iint_S \left[t \frac{\partial t}{\partial x} \cos(n, x) + t \frac{\partial t}{\partial y} \cos(n, y) + t \frac{\partial t}{\partial z} \cos(n, z) \right] ds \\ &= \iiint_G \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(t \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(t \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(t \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] dG \\ &= \iiint_G \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dG + \iint_G t \Delta^2 t dG \end{aligned}$$

由于 $t|_s = 0$, 所以

$$\begin{aligned} & \iiint_G t \Delta^2 t dG \\ &= \iint_S t \frac{\partial t}{\partial n} ds - \iiint_G \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dG \\ &= - \iiint_G \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dG \end{aligned}$$

则该泛函的变分为

$$\begin{aligned} \delta J_1[t] &= - \iiint_G 2 \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) \Delta \delta t dG \\ &= - 2 \iiint_G \Delta t \delta t dG \end{aligned}$$

现利用 Green 第一公式

$$\oint_S u \Delta v ds = \iiint_G (\Delta u \Delta v + u \Delta^2 v) dG$$

用 Δt 代替 Δv , 用 δt 代替 u , 得

$$\delta J_1[t] = - 2 \oint_S \Delta t \delta t ds + 2 \iiint_G \Delta^2 t \delta t dG$$

由于 $\delta t|_s = 0$, 则

$$\delta J_1[t] = 2 \iiint_G \Delta^2 t \delta t dG$$

由泛函的极值条件可知, 该泛函的欧拉方程就是公式(1)。

对于本文给出的边界条件, 由于

$$\begin{aligned} \delta J_1[t] &= -2 \oint_s \Delta t \delta t ds + 2 \iiint_G \Delta^2 t \delta t dG \\ &= -2 \iint_{s_1} \frac{\partial t}{\partial n} \delta t ds - 2 \iint_{s_2-s_6} \frac{\partial t}{\partial n} \delta t ds \\ &\quad + 2 \iiint_G \Delta^2 t \delta t dG \\ &= 2 \iint_{s_1} \frac{q}{\lambda} \delta t ds + 2 \iint_{s_2-s_6} \frac{\lambda}{\alpha_s} (t - t_f) \delta t ds \\ &\quad + 2 \iiint_G \Delta^2 t \delta t dG \end{aligned}$$

故(1)式的泛函为

$$\begin{aligned} J[t] &= -2 \iint_{s_1} \frac{q}{\lambda} t dG \\ &\quad + \iint_{s_2-s_6} \left(\frac{2\lambda t_f}{\alpha_s} t - \frac{\lambda}{\alpha_s} t^2 \right) dG + \iiint_G t \Delta^2 t dG, \quad (2) \end{aligned}$$

对于这种复杂边界条件的稳定热传导问题, 一般很难求出满足公式(2)的极值温度分布函数 $t(x, y, z)$ 表达式。现利用有限元法将模拟件划分为一系列的实体单元, 采用节点双线性温度插值函数, 将单元温度函数代入泛函表达式(2), 可求出相应各单元的刚度矩阵及总刚度矩阵, 再利用相应的载荷列阵, 就可求出床身模拟件任意节点的温度。床身模拟件的网格划分方式分别如图3及图4所示。

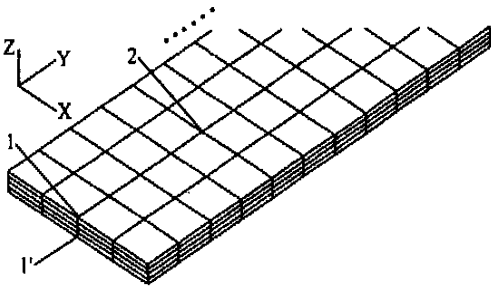


图3 柔性床身模拟件有限元网格划分

Fig. 3 FEM griding of flexible simulating parts of machine beds.

3 有限元计算结果与实验结果对比及分析

为研究床身模拟件的弯曲刚度对其热态几何精度的影响, 本文通过有限元方法分析了图2实验装置床身模拟件的温度分布规律, 并与实验结果进行对比。实验在图2所示实验装置上进行, 床身模拟件上下表面各六等分点(上表面依次为1, 2, ..., 7; 下表面各等分点的位置与上表面各等分点的位置完全对应, 依次为1', 2', ..., 7', 图中只画出1, 2两点, 其它略。)的温度用测量精度为0.1℃的8801温度计测量, 因热源相对于床身模拟件的位置前后、左右对称, 故只测左侧四个点的温度分布及变形情况即可。床身模拟件各等分点的变形量用均布在试件长度方向上的四块千分表测量, 床身模拟件上表面与下表面的温度差可以通过改变加热板的输入电压调节。

实验过程中, 先将四个千分表的触头与床身模拟件自左至右的四个等分点接触, 然后接通电源, 床身模拟件上下表面因吸收加热板1放出的热量不同而产生温差, 调整调压器3的电压可使床身模拟件上下表面产生不同的温差。调压器稳定工作一定时间后, 床身模拟件处于热平衡状态, 记录此时床身模拟件对应点上表面与下表面的温差和上表面各点处的变形值, 每组实验重复三次, 取其平均值作为最后测量结果。表1-1、表1-2和表2-1、表2-2分别列出了不同工况下的有限元计算数据和实验测量数据。

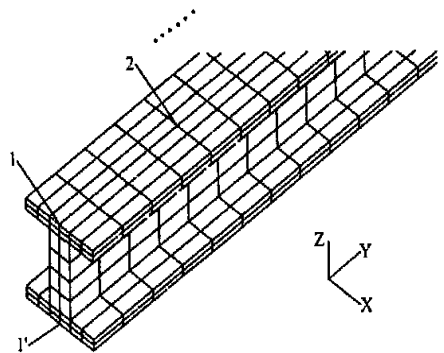


图4 刚性床身模拟件有限元网格划分

Fig. 4 FEM grid of rigidizing simulating parts of machine beds.

表 1-1 柔性床身模拟件上下表面温差及热变形数据

Table 1-1 Temperature differences of upper and lower surfaces of flexible machine bed's simulating parts and data of thermal deformation

	1- 1'		Error (%)	1	2- 2'		Error (%)	2
	Simulating value of temperature difference/ °C	Measuring value of temperature difference/ °C			Measuring value of deformation/ μm	Simulating value of temperature difference/ °C		
1	0.27	0.3	10.0	0	0.37	0.4	7.5	0
2	0.67	0.8	16.3	0	0.73	0.8	8.8	0
3	1.16	1.4	17.1	0	1.24	1.5	17.3	0
4	1.27	1.6	20.6	0	1.75	1.8	2.8	0
5	1.39	1.7	18.2	0	1.83	1.8	1.7	1.7
6	1.62	2.0	19.0	0	2.20	2.1	4.8	3.3

表 1-2 柔性床身模拟件上下表面温差及热变形数据

Table 1-2 Temperature differences of upper and lower surfaces of flexible machine bed's simulating parts and data of thermal deformation

	3- 3'		Error (%)	3	4- 4'		Error (%)	4
	Simulating value of temperature difference/ °C	Measuring value of temperature difference/ °C			Measuring value of deformation/ μm	Simulating value of temperature difference/ °C		
1	0.40	0.4	0.0	0	0.41	0.5	18	0
2	0.81	0.9	10	0	0.82	1.0	18	0
3	1.38	1.5	8.0	0	1.40	1.7	15.3	0
4	1.94	1.9	2.1	0	1.97	2.1	6.2	0
5	2.00	2.0	0.0	2.0	2.10	2.2	4.5	2.3
6	2.43	2.3	5.6	4.0	2.46	2.4	2.5	5.3

表 2-1 刚性床身模拟件上下表面温差及热变形数据

Table 2-1 Temperature differences of upper and lower surfaces of rigid machine bed's simulating part and data of thermal deformation

	1- 1'		Error (%)	1	2- 2'		Error (%)	2
	Simulating value of temperature difference/ °C	Measuring value of temperature difference/ °C			Measuring value of deformation/ μm	Simulating value of temperature difference/ °C		
1	0.18	0.2	10	0	0.34	0.3	13.3	0
2	0.33	0.4	17.5	0	0.43	0.4	7.5	0
3	0.42	0.5	16.0	0	0.69	0.7	1.4	2.0
4	0.49	0.6	18.3	0	0.84	0.7	20.0	5.3
5	0.63	0.7	10.0	0	0.92	0.8	15.0	7.3
6	1.20	1.3	7.7	0	1.38	1.4	1.4	11.0

表 2-2 刚性床身模拟件上下表面温差及热变形数据

Table 2-2 Temperature differences of upper and lower surfaces of rigid machine bed's simulating part and data of thermal deformation

	3-3		Error (%)	3	4-4		Error (%)	4
	Simulating value of temperature difference/°C	Measuring value of temperature difference/°C			Measuring value of deformation/ μm	Simulating value of temperature difference/°C		
1	0.38	0.4	5.0	0	0.39	0.4	2.5	0
2	0.46	0.4	15	0	0.47	0.5	6.0	0
3	0.75	0.7	7.1	2.3	0.76	0.8	5.0	4.3
4	0.92	0.9	2.2	9.7	0.93	0.9	3.3	10.3
5	1.00	0.9	11.1	12.0	1.01	1.1	8.2	16.3
6	1.50	1.4	7.1	13.3	1.52	1.6	5.0	17.0

分析表 1、表 2 所列温差模拟值和温差实测值数据可知,有限元模拟结果与实验测试结果基本接近,说明理论分析正确,实验装置符合要求;分析表 1 所列实测变形值数据可知,柔性床身模拟件在上下表面温差最大达到 2.2°C 时才开始产生弯曲变形,其最大变形量为 2.3 μm ;这表明柔性床身模拟件在上下表面温差最大达到 2.2°C 之前,它是具有自准直特性的,此时试件的重力变形能自动补偿温差引起的变形量;当上下表面温差大于或等于 2.2°C,柔性床身模拟件就不具备自准直特性了。分析表 2-1、2-2 所列实测变形值数据可知,刚性试件在上下表面温差最大达到 0.8°C 时,就开始产生弯曲变形,其最大变形量为 4.3 μm ,这表明刚性床身模拟件在上下表面温差达到 0.8°C 之前,它是具有自准直特性的,试件上下表面温差大于或等于 0.8°C,刚性床身模拟件就不再具有自准直特性了。

综上所述可知,在一定温差范围内,无论柔性床身模拟件还是刚性床身模拟件均具有自准直特

性,所不同的是,柔性床身模拟件在较大的温差范围内具有自准直特性,刚性床身模拟件仅在较小的温差范围内才具有自准直特性。构件的弯曲刚度越大,构件自重变形补偿热变形的能力越差。

4 结 论

(1) 床身模拟件的弯曲刚度的大小与其补偿热变形的能力有着密切的关系;在同等条件下,床身模拟件的弯曲刚度越小,其重力变形自动补偿热变形的能力越强。

(2) 床身模拟件的这一特性对于设计大型精密机床床身、工作台等基础件有着非常重要的意义,因为它可以消除环境温度周期性变化以及工作台与床身之间摩擦热引起的床身热变形。

(3) 对于像床身等具有隔板及空洞的零件,可以将空洞用沙子填充,由于床身自重增加,可明显提高其抵抗热变形的能力。

参考文献:

- [1] Bryan J. International status of thermal error research[J]. *Annals of the CIRP*, 1990, 39(2): 645-656.
- [2] 杨明,王建设.热环境试验中的温度测量及数据处理软件[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(6): 544-546.
- [3] 王建设.空间光学遥感器轨道外热流的模拟[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(4): 328-330.
- [4] Takada K, Tanabe I. Basic study on thermal deformation of machine tool structure composed of epoxy resin concrete and cast iron[J]. *Bull. Japan Soc. of Prec. Eng.*, 1987, 21(3): 173-178.
- [5] Balsamo A, Marques D, Sartori S. A Method of thermal deformation corrections of CMMs[J]. *Annals of CIRP*, 1990, 39(1): 557-560.
- [6] 曾福胜.机床导轨自准直设计原理及其在导轨磨床中应用的研究[D]. 吉林大学, 2000.
- [7] 孙靖民.机床结构计算的有限元法[M].北京:机械工业出版社, 1983.

Applied investigation on the effects of bending stiffness of machine bed's simulating parts on its thermal geometrical precision

YAN Zhan_hui¹, YU Jun_yi², ZENG Fu_sheng², CAO Yi³

(1. Department of Mechanical Engineering,

Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. Mechanical School of Jilin University, Changchun 130025, China;

3. Jilin Academy of Mechanics and Electronics, Changchun 130012, China)

Abstract: In this paper, thermal analysis is narrated for two kinds of machine beds' simulating parts whose bending stiffnesses are not obviously equal under the condition of the thermal source similar to the environmental temperature or frictional heat. 3-D thermal conduction characteristics are discussed, and corresponding functional expression is also deduced. Moreover, temperature field distribution values are calculated by FEM program. The results show that they are near to the experimental values. Comparing machine beds' simulating parts of small bending stiffness with those of large bending stiffness, the experimental results show that the former one's thermal geometrical precision is obviously better than the latter one's. Therefore, in order to improve the structures of machine beds, for the first time, this paper puts forward the idea that the gravity deformation of the simulating parts of machine beds can automatically compensate the thermal deformation caused by variable environmental temperature or frictional heat by means of properly decreasing the curving stiffness of the simulating parts and eliminating the bondage of other parts to the deformation of the machine beds' simulating parts. This principle provides a new method of eliminating basically thermal deformation of large-scale and precision machine tools.

Key words: machine tools; machine beds' simulating parts; bending stiffness; thermal geometrical precision; heat deformation

作者简介: 闫占辉(1968-), 男, 吉林双阳人, 长春工程学院机械系讲师, 吉林大学机械科学与工程学院在职博士研究生, 主要研究方向为机械系统动力学与加工精度, 发表论文十余篇, E-mail: zhanhui-yan@sohu.com.cn;
于骏一(1933-), 男, 吉林大学机械学院教授、博士生导师;
曾福胜(1975-), 男, 吉林大学机械学院硕士研究生;
曹毅(1932-), 男, 吉林省机电研究设计院高级工程师。