

环境温度波动对精密卧式加工中心 基础件几何精度的影响*

姜耀林¹, 李 旻², 赵万华², 张晓毅³, 郑儒鸿¹, 徐登辉¹

- (1. 浙江省机电设计研究院, 浙江 杭州 310002;
2. 西安交通大学 机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 沈机集团昆明机床股份有限公司, 云南 昆明 650203)

摘要: 精密卧式加工中心不仅可以快速方便地完成复杂零件的加工,而且具有较高的加工精度。然而由于环境温度的波动变化,使得机床各部件尤其是床身、立柱等尺寸较大的基础件产生热变形,从而影响机床精度。针对以上问题,利用有限元方法对不同环境温度下床身和立柱的温度场和热变形进行了仿真分析,进而得到了环境温度波动幅值和周期对机床基础件几何精度的影响规律。研究表明,该影响规律可为恒温车间温度控制和机床热变形补偿提供一定的依据。

关键词: 环境温度波动; 精密卧式加工中心; 机床基础件; 几何精度

中图分类号: TG65; TH161

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-0997-05

Impact of ambient temperature variation on geometrical accuracy of basic parts in precision horizontal processing center

JIANG Yao-lin¹, LI Yang², ZHAO Wan-hua², ZHANG Xiao-yi³, ZHENG Ru-hong¹, XV Deng-hui¹

- (1. Zhejiang Institute Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310002, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;
3. Shenji Group Kunming Machine Tool Company Limited, Kunming 650203, China)

Abstract: Precision horizontal processing center is a kind of machine tool which can not only process parts with complex structures but also guarantee high machining precision. However, the temperature variation would bring about the thermal deformation of the machine tool parts. The bed and the column and other large parts would be influenced easily. Therefore, the accuracy of the machine tool would be decreased. Aiming at above problems, with finite element method, the temperature fields and thermal deformations of the bed and the column were analyzed. It was found that the amplitude and the cycle of the varying ambient temperature have large effects on the geometrical accuracy of basic parts, and the laws of them were concluded. The results of research provides basis for the temperature control in the constant temperature workshop and the thermal error compensation for the machine tool.

Key words: temperature variation; precision horizontal processing center; basic parts of machine tool; geometrical accuracy

0 引 言

随着机床向高速高精方向发展,人们对机床静态精度和加工精度提出了更高的要求。对机床来说,存在着众多热源。热源强度、分布位置的不同以及机

床各部分导热和散热条件的不一致,使得机床具有不均匀的温度场,从而产生热变形,影响机床精度^[1]。英国伯明翰大学 Peklenik 教授的统计表明,由机床热变形引起的热误差占总机床误差的40%~70%^[2]。机床的热源可分为内热源和外热源。内热源为机床运行或加

收稿日期: 2012-04-19

基金项目: 国家重大科技专项资助项目(2010ZX04001-021)

作者简介: 姜耀林(1965-),男,浙江嘉兴人,高级工程师,主要从事机电产品检测方面的研究。E-mail: JYL5133@163.com

工过程中产生的大量热量的部件,如主轴轴承、齿轮、电机、丝杠、导轨以及切削时刀具和切屑;外热源指机床外部环境,如日光的照射和车间环境温度的变化^[3]。

床身、立柱作为机床的基础件,尺寸较大,在环境温度这一外热源的影响下会产生较大的热变形,从而影响导轨的直线度、平行度、垂直度和机床整体精度。例如,一龙门刨床床身長 10 m、高 0.8 m,当温度变化 1 °C 时,导轨热变形可达 0.19 mm^[4]。关于环境温度对机床的影响,国内外学者做了很多研究。闫占辉^[5-6]对不同时间车间温度的变化进行了统计,得出在垂直地面方向上环境温度分布规律,并对环境温度变化引起的机床基础和床身热变形进行了测试,提出一种新的基础机构用以减小此类热变形;曹毅对不同天气车间的温度分布进行了测试,并研究了温度变化对床身导轨在水平面和垂直面精度的影响。但二者研究都基于实验统计,耗时长,且未考虑不同的环境温度变化幅值、周期对机床精度的影响。此外,王宪平^[7]、美国 LLNL 实验室为了实现高精度的环境温度控制,以减小其对精密机床加工精度的影响,通过将实验室建在隔温掩蔽间内以及采用高级温控系统,从而实现将环境温度分别控制在 ±0.05 °C 和 ±0.04 °C 以内。然而建造恒温车间和温控系统不仅花费大,而且空调设备会消耗大量能源。根据 Hattori 的研究^[8],空调设备消耗的能源占总能源的 80%。

本研究以某型号精密卧式加工中心为对象,利用 ANSYS 有限元仿真软件,对不同环境温度下床身、立柱的温度场和热变形进行仿真,分析不同环境温度波动幅值和周期下机床床身和立柱的几何精度,结合机床设计精度要求和分析结果,得到最佳的环境温度波动幅值和周期,为恒温车间温度设定与控制、能源节约使用以及机床热变形补偿提供依据。

1 环境温度波动特性

根据 ISO230 中的规定,环境温度的重要参数包括空气的流动速度、环境温度波动的频率和幅值、平均环境温度以及环境温度的水平梯度和垂直梯度^[9]。

精密卧式加工中心通常放置在恒温车间内,近似认为车间内空气流动速度很小,平均温度为 20 °C,且在水平和垂直方向内环境温度不存在梯度。因此,本研究重点关注环境温度波动幅值和周期对机床精度的影响。Tanabe^[10]、Jedrzejewski^[11]、Weck^[12]在实验研究中发现,24 h 内车间环境温度的变化近似为正弦曲线,本研究为简化计算,现将环境温度的变化近似按三角波形式进行处理^[13-14],波动幅值选用常用的 6 个恒温精度,0.2 级、0.5 级、1 级、2 级、4 级、6 级,对应恒温精度

为 ±0.2 °C、±0.5 °C、±1 °C、±2 °C、±4 °C、±6 °C^[15];波动周期设为 1/6 h、1/3 h、1/2 h、2/3 h 和 1 h。

2 床身与立柱的有限元模型

2.1 实体模型与网格划分

笔者以某型号精密卧式加工中心的床身和立柱为研究对象,建立其实体模型时在尽量保持零件的原始结构基础上进行如下简化:① 删除细小特征,如倒角、凸台;② 忽略次要部件,如滚珠丝杠系统。床身和立柱的材料为灰铸铁,其材料属性如表 1 所示。

由于研究重点为导轨安装面的精度,本研究在床身和立柱导轨安装面上进行网格细化,划分方法为四面体自由划分,单元大小通过手动设置;其他部位的网格划分同样采用四面体自由划分方法,但可适当划分得稀疏一些。

精密卧式加工中心床身、立柱的有限元分析模型如图 1 所示。

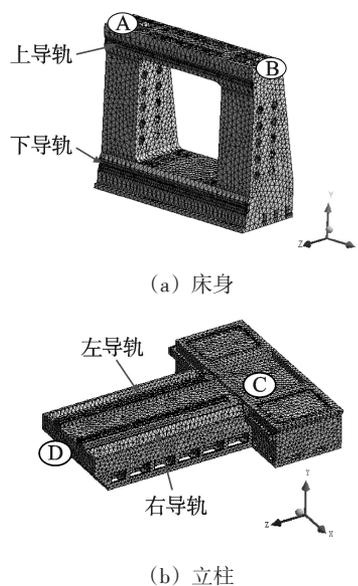


图 1 精密卧式加工中心有限元分析模型

表 1 材料属性表

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
灰铸铁	7 600	140	0.25
比热/(J/(kg·°C))	470	导热系数/(W/(m·K))	热膨系数/(1/°C)
		39.2	1.1×10 ⁻⁵

2.2 边界条件设置

机床的热源分为内热源与外热源。由于该精密卧式加工中心的内热源,即机床内部局部发热(如主轴、电机、丝杠发热),已经通过冷却、热误差补偿等方法得到了控制,本研究暂不考虑内热源的影响,重点关注环境温度这一外热源对机床基础件几何精度的影响。

初始环境温度为 20 °C,本研究近似认为床身温度保持不变,与初始环境温度相同。恒温车间内空气流

动速度很小,机床床身、立柱与环境间的换热方式为自然对流换热,自然对流换热系数理论计算公式^[16]如下:

$$h = (Nu \cdot \lambda) / l \tag{1}$$

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \tag{2}$$

$$Gr = \frac{g \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} \tag{3}$$

$$Gr^* = \frac{g \cdot \alpha \cdot q \cdot l^4}{\lambda \nu^2} \tag{4}$$

式中: Nu —努赛尔数; λ —流体导热系数, $W/m \cdot K$; l —特征长度, m ; Gr —格拉晓夫准数; Pr —普朗特数; C, n —常数; g —重力加速度, m/s^2 ; α —体积膨胀系数, $1/^\circ C$; Δt —流体与壁面的温度差, $^\circ C$; ν —运动粘度, m^2/s ; q —热流密度, W/m^2 。

式(2)中的常数 C 和 n 的取值如表 2 所示。

表 2 式(2)中的常数 C 和 n

表面形状	C	n	适用范围
竖平壁	0.59	1/4	$10^4 \leq (Gr \cdot Pr)$
			$\leq 3 \times 10^9$
	0.029	0.39	$3 \times 10^9 \leq (Gr \cdot Pr)$
水平壁热面朝上或冷面朝下	0.11	1/3	$\leq 2 \times 10^{10}$
			$(Gr \cdot Pr) > 2 \times 10^{10}$
水平壁热面朝下或冷面朝上	1.076	1/6	$6.37 \times 10^5 \leq Gr^*$
	0.747	1/6	$\leq 1.12 \times 10^8$
			$6.37 \times 10^5 \leq Gr^*$
			$\leq 1.12 \times 10^8$

根据式(1~4),结合床身、立柱的结构形状以及材料属性,计算得到不同环境温度下,二者与环境间的对流换热系数(如表 3 所示),温度波动幅值较小时,正波动和负波动下对流换热系数基本一致。

表 3 床身、立柱的对流换热系数

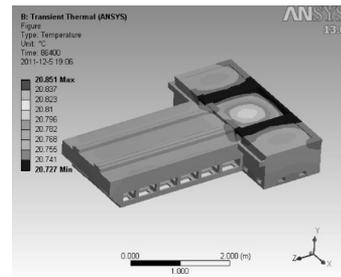
温度波动幅值 / $^\circ C$	对流换热系数/ $(W/(m^2 \cdot K))$	
	床身	立柱
+0.2	0.93	0.785
-0.2	0.93	0.785
+0.5	1.26	0.99
-0.5	1.26	0.99
+1	1.58	1.17
-1	1.59	1.17
+2	1.99	1.59
-2	2.01	1.61
+4	2.50	2.07
-4	2.54	2.12
+6	2.85	2.40
-6	2.92	2.50

3 环境温度波动对床身和立柱的影响

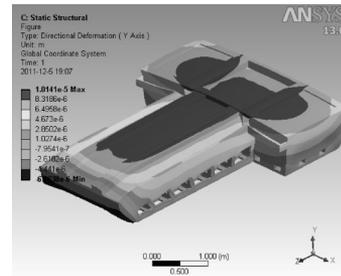
3.1 环境温度波动下床身和立柱温度场及热变形

结合上述分析计算结果,本研究利用 ANSYS

Workbench 软件,分别对不同环境波动周期和幅值下的床身、立柱的温度场和热变形进行仿真。以温度波动幅值 $\pm 6^\circ C$,波动周期 1 h 为例,分析环境温度波动下床身、立柱的温度场及热变形,如图 2~3 所示。从图 2~3 中可以看出,当环境温度波动时,床身和立柱会产生一定的热变形。由于床身左右结构对称,左右两导轨安装面热变形相似。但立柱上下导轨安装面变形差别很大,例如环境温度波动周期为 1/6 h,波动幅值为 $\pm 6^\circ C$ 时,立柱上导轨安装面沿其垂直方向最大变形量为 $10.80 \mu m$,而下导轨安装面沿其垂直方向最大变

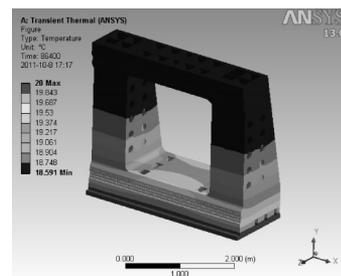


(a) 温度场

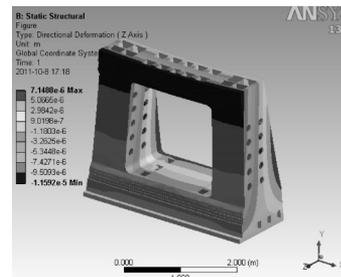


(b) Y 向热变形

图 2 环境温度波动周期 1 h,波动幅值 $\pm 6^\circ C$ 床身温度场和热变形



(a) 温度场



(b) Z 方向热变形

图 3 环境温度波动周期 1 h,波动幅值 $\pm 6^\circ C$ 立柱的温度场和热变形

形量仅为 3.20 μm,这是由于立柱下端与床身用螺钉连接,限制了一部分热变形。

此外,仿真计算发现,不同温度波动周期和幅值下,导轨安装面变形方向、大小均不同。例如,当环境温度波动周期为 1 h,波动幅值为±6 °C时,床身导轨安装面沿其垂直方向凸起,最大变形处为C端(如图 1 所示),为 9.60 μm。而当环境温度波动周期为 1/6 h,波动幅值为±6 °C时,床身导轨安装面沿其垂直方向下凹,最大变形处为D端(如图 1 所示),为 2.52 μm。在环境温度波动时,立柱导轨安装面的变形最大处为导轨两端(A、B端,如图 1 所示)。

3.2 环境温度波动对直线度的影响

床身、立柱作为机床基础件,其导轨安装面垂直方向上的热变形将直接影响导轨安装的直线度,从而降低机床的几何精度。根据国标 GB/T 11336-2004 规定,本研究利用最小包容区域法计算导轨安装面的直线度误差。由计算结果发现,当温度波动幅值小于等于±4 °C时,精密卧式加工中心床身和立柱的导轨安装面直线度均小于设计要求的 3 μm;当环境温度波动幅值小于等于±2 °C时,导轨安装面直线度不超过 1 μm,因此将恒温实验室的温度波动幅值控制在±2 °C时,即可获得较高机床导轨安装面直线度。环境温度波动幅值为±2 °C、±4 °C时,床身、立柱导轨安装面直线度误差随环境温度波动周期变化图如图 4~5 所示。由图

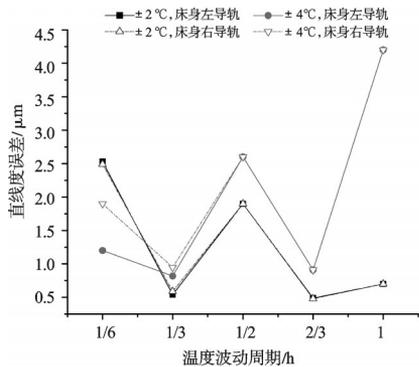


图 4 环境温度波动幅值为±2 °C、±4 °C时,床身导轨安装面直线度误差随环境温度波动周期变化图

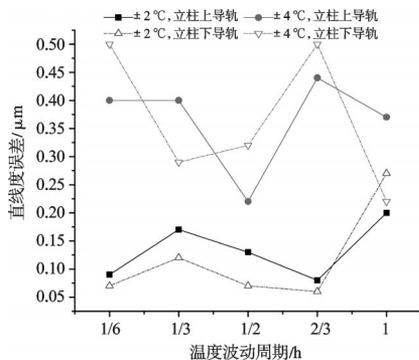


图 5 环境温度波动幅值为±2 °C、±4 °C时,立柱导轨安装面直线度误差随环境温度波动周期变化图

4~5 可以看出,当环境温度波动周期为 2/3 h 时,床身、立柱导轨的直线度误差相对较小。因此,当恒温车间温度波动幅值控制在±2 °C、波动周期为 2/3 h 时,可保证机床基础件具有较小的直线度误差 (< 0.2 μm)。

3.3 环境温度波动对平行度的影响

笔者所研究的精密卧式加工中心床身和立柱均为双导轨,分别以床身右导轨和立柱上导轨安装面为基准计算两导轨安装面的平行度误差,由计算结果发现,当温度波动幅值小于等于±4 °C时,床身和立柱导轨安装面平行度误差均小于设计要求的 3 μm;当环境温度波动幅值小于等于±2 °C时,平行度误差不超过 1 μm。环境温度波动幅值为±2 °C、±4 °C时,床身、立柱导轨安装面平行度误差随环境温度波动周期变化图如图 6 所示。从图 6 中可以看出,当恒温车间温度波动幅值控制在±2 °C、波动周期为 2/3 h 时,可保证机床基础件两导轨安装面具有较小的平行度误差 (< 0.2 μm)。

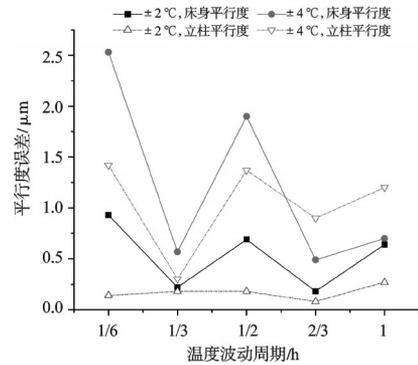


图 6 环境温度波动幅值为±2 °C、±4 °C时,床身和立柱导轨安装面 Y 方向平行度误差随环境温度波动周期变化图

再以地面为基准,计算精密卧式加工中心床身的平行度。由计算结果发现,当温度波动幅值小于等于±2 °C时,床身与地面的平行度小于设计要求的 3 μm;当环境温度波动幅值小于等于±1 °C时,与地面的平行度不超过 1 μm。环境温度波动幅值为±1 °C、±2 °C时,床身与地面的平行度随环境温度波动周期的变化图如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当恒温车间温度波动幅值控制在±2 °C、波动周期为 2/3 h 时,可保证机床床身具有较

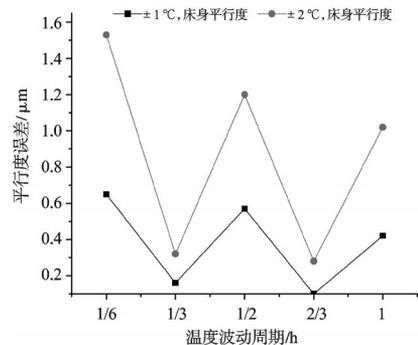


图 7 环境温度波动幅值为±1 °C、±2 °C时,床身 Y 方向平行度随环境温度波动周期变化图

小的平行度误差 ($<0.3\mu\text{m}$)。

3.4 环境温度波动对立柱垂直度的影响

本研究以地面为基准,计算精密卧式加工中心立柱的垂直度。由计算结果发现,当温度波动幅值小于等于 $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,床身与地面的平行度小于设计要求的 $3\mu\text{m}$;当环境温度波动幅值小于等于 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,与地面的平行度不超过 $1\mu\text{m}$ 。环境温度波动幅值为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,床身与地面的平行度随环境温度波动周期的变化图如图8所示。从图8中可以看出,环境温度波动幅值为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、波动周期为 $1/3\text{ h}$ 、 $1/2\text{ h}$ 、 $2/3\text{ h}$ 时,机床立柱的垂直度误差分别小于 $0.4\mu\text{m}$ 、 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 。根据分析结果,对恒温车间温度波动的幅值和周期进行控制,可保证机床基础件具有较小的垂直度误差。

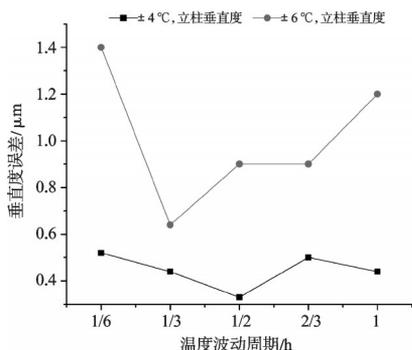


图8 环境温度波动幅值为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,立柱垂直度随环境温度波动周期变化图

4 结束语

恒温车间中的环境温度作为精密卧式加工中心外热源,会引起机床热变形,从而影响机床尤其是机床基础件的几何精度。基于有限元仿真,本研究分析了环境温度变化对机床床身、立柱及其双导轨精度的影响规律,发现:

(1) 当恒温车间温度波动幅值控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、波动周期为 $2/3\text{ h}$ 时,可保证机床基础件具有较小的直线度误差 ($<0.2\mu\text{m}$);

(2) 当恒温车间温度波动幅值控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、波动周期为 $2/3\text{ h}$ 时,可保证机床基础件具有较小的平行度误差 ($<0.2\mu\text{m}$);

(3) 从图中可以看出,当恒温车间温度波动幅值控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、波动周期为 $2/3\text{ h}$ 时,可保证机床床身具有较小的平行度误差 ($<0.3\mu\text{m}$);

(4) 环境温度波动幅值为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而波动周期为 $1/3\text{ h}$ 、 $1/2\text{ h}$ 、 $2/3\text{ h}$ 时,机床立柱的垂直度误差分别小于 $0.4\mu\text{m}$ 、 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 。

综上所述,工厂通过环境温度监控,将恒温车间

温度变化幅值控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而波动周期为 $2/3\text{ h}$ 时,可将环境温度波动对精密卧式加工中心基础件几何精度的影响降到最低,保证精密卧式加工中心基础件具有较高的几何精度,从而实现在保证机床精度的同时,达到减小能源消耗、降低成本的目的。

参考文献(References):

- [1] 戴德沛,顾崇銜. 内圆磨床的热变形及其对加工精度的影响[J]. 西安交通大学学报,1964(3):19-38.
- [2] PEKLENIK J. Untersuchung der Genauigkeitsfragen in der automatisierten Fertigung[M]. Koln: Westdeutscher Verlag, 1961.
- [3] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools—a review part 2: thermal errors[J]. *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, 2000, 40(9): 1257-1284.
- [4] 郭学详,胡友民,夏军勇,等. 基于有限元分析的机床导轨热变形研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2007(3): 8-11.
- [5] 闫占辉,于骏一,曹毅. 环境温度变化对机床基础热变形的影响规律[J]. 吉林工业大学学报,2002,32(1):33-36.
- [6] 闫占辉,曹毅. 环境温度分布特征及其对机床热变形影响规律的分析[J]. 汽车工艺与材料,2007(3):39-41.
- [7] 王宪平,李圣怡. 超精密环境温度控制及温度测量技术研究[J]. 中国机械工程,2000,11(8):869-871.
- [8] HATTORI H, NOGUCHI H, ITO S, et al. Estimation of thermal deformation in machine tools using neural network technique[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 56(1): 765-772.
- [9] ISO 230-3-2001, 机床检验通则(IDT):热效应的确定[S].
- [10] TANABE I, TAKADA K. Thermal deformation of machine tool structures using resin concrete[J]. *JSME International Journal*, 1994, 37(2): 384-389.
- [11] JEDRZEJEWSKI J, MODRZYCKI W, WOWAL Z, et al. Precise modeling of HSC machine tool thermal behavior [J]. *Journal of Achievement in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, 24(1): 245-252.
- [12] WECK M, MCKEOWN P. Reduction and compensation of thermal errors in machine tools[J]. *Annals of the CIRP*, 1995, 44(2): 589-598.
- [13] 李兵. 加工中心丝杆与导轨的故障分析与维修[J]. 机电技术,2010(4):89-90.
- [14] 楚文龙,李英杰,杨冬. 基于卧式加工中心主轴箱的可靠性增长技术研究[J]. 现代制造技术与装备,2011(2): 17-18.
- [15] 卢泽生,张强. 温度对超精密位移系统定位精度影响的研究[J]. 机床与液压,2006,34(10):33-36.
- [16] 杨世铨,陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,1998.

[编辑:罗向阳]