

超精密车床伺服进给机构设计研究

戴一帆, 彭小强

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在分析影响超精密金刚石车床伺服进给机构运动精度的误差源的基础上, 不采取提高机床部件制造精度的办法, 而从伺服进给机构的机械结构上提出消除这些误差的措施。这些措施主要包括: 利用闭合的复合节流方式的气体静压导轨结构与在丝杠与工作台联接之间安装浮动单元。经过实践证明这些措施是有效的, 使自研的超精密车床的伺服进给机构运动精度完全达到超精密加工的需求。

关键词: 超精密加工; 气体静压导轨; 复合节流; 浮动单元

中图分类号: TH166 文献标识码: A

1 引言

超精密加工(Ultra-Precision Machining)是一门综合性的系统工程, 它的发展综合地利用了机床、工具、计量、环境技术、微电子技术、计算机技术、数控技术等技术的进步。目前它已成为机械制造发展的重要方向之一, 同时也是元器件制造和掌握当今尖端技术的关键技术和手段。

影响超精密加工机床精度的因素很多, 例如环境温度的影响、主轴偏转误差、测量误差等。其中伺服进给机构运动误差是影响超精密加工机床精度的主要因素之一。因此, 伺服进给机构的设计需以满足伺服进给机构运动精度为主要目标。伺服进给机构运动误差主要来源于以下几个方面:

①导轨的直线度误差引起伺服进给机构运动误差; ②机床静态刚度过小的影响; ③滚珠丝杠误差的影响; ④伺服电机的振动及轴不对中带来的影响。要减小伺服进给机构运动误差就要抑制这些误差源的影响。由于受机械制造水平及加工成本的影响, 依靠进一步提高机床部件的加工精度来减小伺服进给机构运动误差是很不现实的。因此, 我们从机床的伺服进给机构系统的机械结构上采取措施来缩小伺服进给机构的运动误差。

2 伺服进给机构的总体设计

2.1 选用气体静压支承

在超精密机床中, 伺服进给机构至少应该具备以下几个特性: ①运动灵活, 无爬行等不连续动作; ②直线精度高; ③具有足够的刚性。因此, 超精

密机床中的导轨一般都用液体或气体静压导轨。由于液体静压导轨的动压效应比气体静压导轨较明显, 而且液体静压导轨中的由于液体粘度较大而引起温升, 但液体温度控制又是一个较难解决的问题, 而这些都是影响伺服进给机构运动精度的因素, 所以, 在设计时优先选用气体静压导轨。而且, 气体静压导轨借助气膜厚度均匀化作用, 能提高伺服进给机构的运动直线度, 这种均匀化作用有点类似于“低通滤波器”, 把导轨表面形貌的“高频”成分过滤掉, 从而提高了工作台运动的直线度。

2.2 应用花岗石作为伺服进给机构主体材料

在选择伺服进给机构主体材料时, 花岗石由于其自身的特性受到越来越多的重视。花岗石主要具有以下几个特性: ①稳定性好, 经过亿万年的天然时效处理, 内应力早已消除, 组织稳定, 能长期保持稳定的精度; ②对温度不敏感。导热系数和热膨胀系数都较小, 而其热传导率也仅为一般金属的 $1/47$, 即使在没有恒温的环境下也能保持精度。在室内温度缓慢变化的条件下, 产生的变形为钢的 $1/10$, 为铸铁的 $1/3$ 。③加工简便。通过研磨、抛光很容易得到很高的表面粗糙度和精度, 不像金属件需要复杂的翻砂、锻造或热处理工艺, 因而加工设备简单, 加工周期短, 加工成品成本低。在表面干净的环境下, 耐磨性为常用铸铁件的 10 倍; ④吸振性好。内阻尼系数比钢大 15 倍。此外, 还具有在大气中不生锈、抗磁、不导电的优点。表1是花岗石的主要性能。所以, 选用花岗石来制造气体静压导轨及气垫。

Table 1 The main performances of granite

coefficient of elasticity (kg/cm ²)	compression strength (MPa)	coefficient of linear expansion (10 ⁻⁶ /K)	log decrement (10 ⁻³)	coefficient of heat conductivity (W/m. K)	density (10 ³ Kg/ m ³)
40	262	5.6	6	3.8	3

2.3 多条导轨并列的设计

把多条导轨并列起来导向, 在过定位状态下, 任意一条导轨上的局部误差造成对伺服进给机构的约束力的变化同时影响其他各条导轨的导向面。且结构尺寸相同的并列导轨刚度随着并列数量增加而增加, 因为局部误差造成的伺服进给机构位置变化会因为刚度的加倍而成比例的降低。所以, 并列导轨可以成倍的提高运动精度, 但随着并列数量的增加, 机床尺寸将成倍增加, 且机床装配时调整难度也加大。综合考虑这些利弊, 选择并列导轨数量为两个。

此外, 导轨结构按对称性设计, 以减少系统变形对运动精度的影响。

3 气体静压导轨的设计

运用气体静压导轨虽然有上文所述的一些优点, 但是气体静压导轨有刚度较小的弱点。因此, 在设计中应该尽量采取措施提高气体静压导轨的刚度。为提高空气静压导轨的刚度, 传统的做法有: ①减小导轨间隙及节流孔直径; ②增大有效面积; ③提高空气供气压力; 但实际上这些方法潜力有限, 实现方法①在精度方面有困难, 方法②导轨的尺寸要增大, 方法③要增大压缩机的动力且极易产生不稳定问题。因此, 在气体静压导轨设计中我们采用了合理的结构形式, 且在节流形式上综合传统方法的优点, 考虑多种节流形式的复合, 采用表面复合节流, 从而大大改善了气体静压导轨的性能。

3.1 采用闭式气体静压导轨

气体静压导轨的结构形式主要有开式导轨和闭式导轨。闭式导轨由于对称的两边气势互相约束, 刚度与承载能力都能大大增加。图1所示为我们设计闭式导轨的结构图。如果采用开式导轨结构, 由于刚度太差, 即使气路采用精密稳压措施, 气压的波动对于伺服进给机构的运动精度的影响也是比较大的。

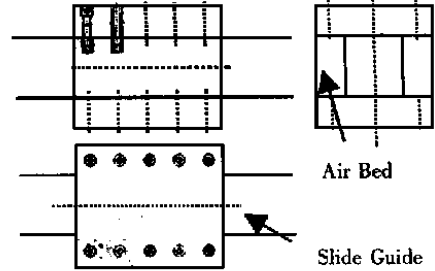
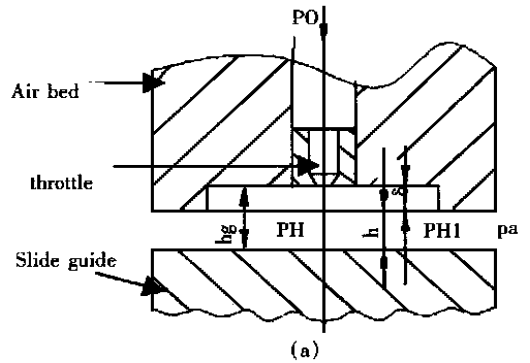


Fig. 1 Structure of closed air-lubricated hydrostatic slide guide

除了应用闭式导轨的结构形式外, 文献[3]中还介绍了一种真空吸附式气体静压导轨, 可以精确限制气隙大小, 减小气膜厚度, 从而达到提高气体静压导轨刚度与精度的目的。但是, 这种导轨结构较为复杂, 调试也比较困难。而且, 还要附加一个真空泵。

3.2 复合节流方式



(a) The section of slide guide and air bed

(b) the surface of air bed

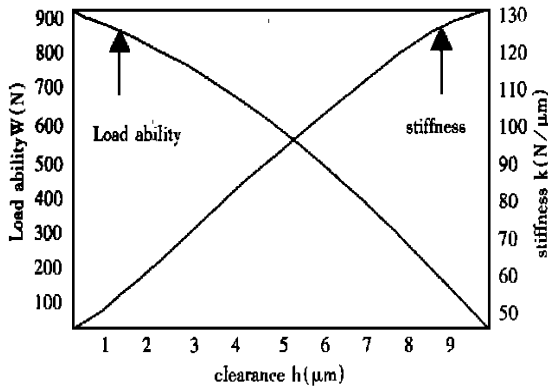
Fig. 2 Multi-throttle air-lubricated hydrostatic slide guide

空气静压导轨节流形式一般包括多孔型节流(小孔节流与自成孔节流)、多孔质节流、缝隙节流与表面节流等。其中多孔质节流与缝隙节流实际应用不多,应用表面节流的导轨虽然可得到高刚度,但耗气量大。如将小孔节流与表面节流方式结合起来,即采用复合节流方式就可集小孔节流与表面节流方式于一体,如图2,不但刚度与承载大幅度提高,且流量也小于表面节流。

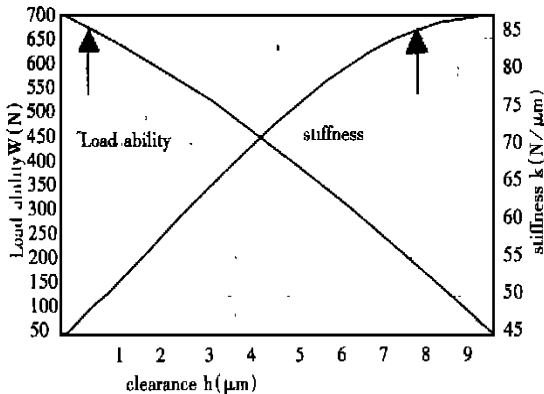
利用文献[2]中所述表面复合节流方式的静压导轨一维流动模型可以得到导轨的承载能力 W 和刚度 K 计算式为:

$$= \frac{4lb(p_{\frac{3}{h}} - p_{\frac{3}{h_1}})}{3(p_{\frac{2}{h}} - p_{\frac{2}{h_1}})} + \frac{4l(B-b)(p_{\frac{3}{h_1}} - p_a^3)}{3(p_{\frac{2}{h_1}} - p_a^2)} - 2BlP_a \quad (1)$$

$$K = - \frac{dW}{dh} \quad (2)$$



(a) multi-throttle



(b) orifice-throttle

Fig. 3 Load and stiffness varied with clearance

我们利用上述公式对结构形式如图1, 节流槽形式如图2的气体静压导轨进行计算, 气垫块为 $60 \times 100 \times 40 \text{mm}^3$, 气垫中 $1 \times b$ 为 $60 \times 15 \text{mm}^2$, 节流槽截面为 $1 \times 0.02 \text{mm}^2$, 节流孔数目为1, 其直径为 $\varnothing 0.2 \text{mm}$, 供气压力为 0.4Mpa , 所

得承载力 W 与刚度 K 随气隙 h 变化如图3a所示。图3b是相同尺寸的气垫块但无节流槽的 $W(h)$ 与 $K(h)$ 图。显然, 采用复合节流方式的气体静压导轨, 承载能力与刚度都能大幅度提高。

要注意的一点是, 采用复合节流方式的气体静压导轨如设计不当容易产生不稳定现象, 因此, 在设计过程中要合理地选择各项参数, 以使气体静压导轨能工作在稳定状态。

4 浮动单元

4.1 联接丝杠与工作台的浮动单元

滚珠丝杠是现时较为通用的回转—直线转换机构, 传动效率可达95%, 而且由于滚珠丝杠在螺母与丝杠之间一次有几个滚珠同时接触, 各构件的几何精度不直接影响运动精度, 其误差被均化了, 综合精度能得到提高。

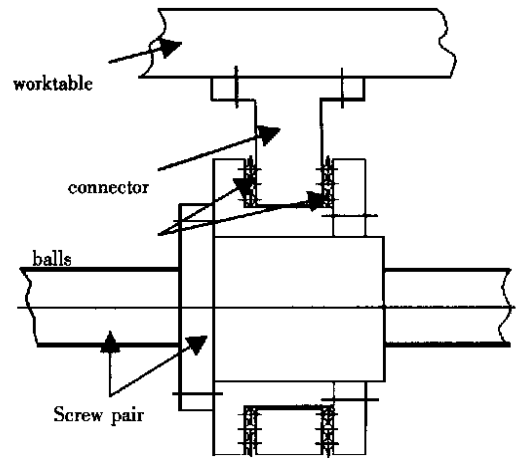
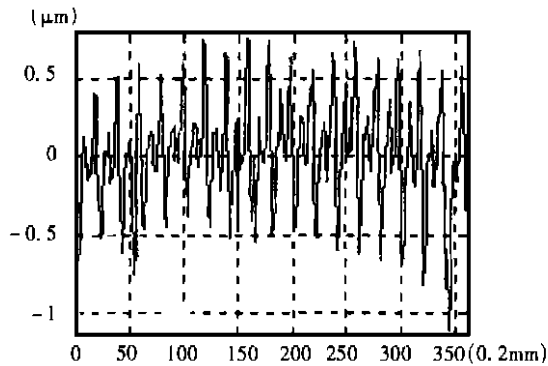


Fig. 4 Float unit mounted on screw pair

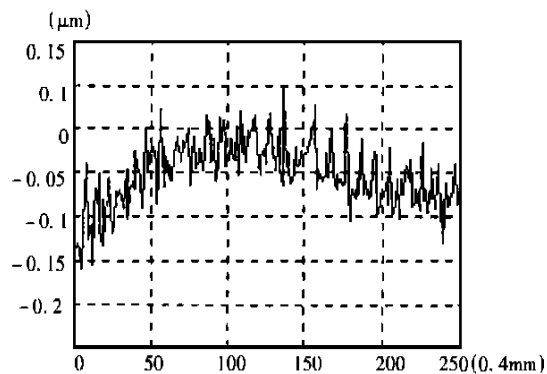
但是, 即使是精密的滚珠丝杠, 由于螺距误差与螺纹间隙等因素的影响, 其导程误差也可达到 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 在 300mm 上的累积误差更可达 $10 \sim 35 \mu\text{m}$ 。因此, 伺服进给机构伺服系统需要采用全闭环反馈控制, 丝杠的轴向综合误差都可以纳入全闭环反馈控制中而得到控制。

对于丝杠径向的误差, 我们设计了图4所示的一种浮动单元结构安装在丝杠螺母与工作台之间, 能有效的消除丝杠径向所产生的误差。这种浮动单元结构是在联接块的两面各填入120个滚珠, 所以, 在丝杠的轴向, 它能保证很高的刚度以传递力矩, 而在丝杠的径向, 由于是滚动摩擦, 其刚度很小, 能有效的将径向传递误差过滤掉。图5是在自研的超精密金刚石车床上所测的数据, 该车床滚珠丝杠的导程为 4mm 。图5a是没安装浮

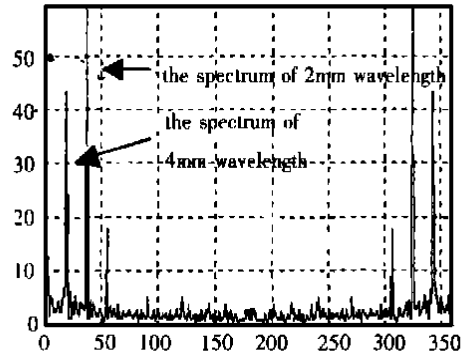
动单元前所测的伺服进给机构运动直线度, 测量间距为 0.2mm , 测量点数为 360 点, 这时的不直线度达到 $1.5\mu\text{m}$, 完全不符合超精密加工的要求。我们将所测的数据做傅立叶变换如图 5c, 从图上可以看出波长为 2mm 与波长为 4mm 的频率成分远大于其他成分, 对于 2mm 波长的周期性成分, 可能是丝杠的不圆度引起; 对于 4mm 波长的周期性成分, 产生原因是当滚珠丝杠两端用球轴承支承时, 由于丝杠自身的挠度及调整误差的影响, 丝杠的回转轴心与固定在工作台上的螺母的中心是不重合的, 因此, 丝杠每转一周, 工作台就会跳动一次而导致伺服进给机构不直线度的周期性。图 5b 所示为安装浮动单元后伺服进给机构运动直线度, 测量间距为 0.4mm , 测量点数为 250 点, 这时伺服进给机构运动直线度为 $0.2\mu\text{m}/100\text{mm}$, 已完全符合超精密加工要求。对安装浮动单元后伺服进给机构运动直线度数据作傅里叶变换如图 5d 所示, 这时与丝杠导程有关的频率成分已基本过滤掉, 丝杠径向所产生的误差基本消除, 使伺服进给机构的运动不直线度大大下降。



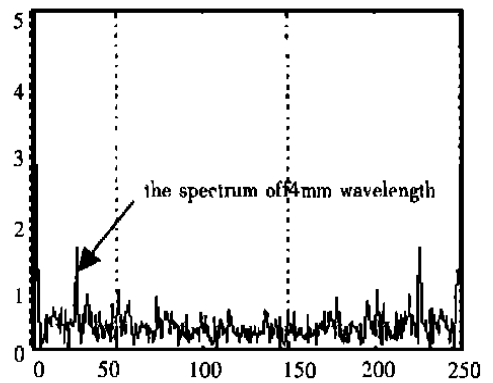
(a) the straightness before mounting float unit



(b) the straightness after mounting float unit



(c) the spectrum of straightness before mounting float unit



(d) the spectrum of straightness after mounting float unit

Fig. 5 The straightness comparison

4.2 柔性联轴器

一般来讲, 伺服电机的振动包括轴向串动, 以及径向的摆动, 如果用刚性联轴器来联接电机轴与丝杠, 这些误差都会传递到工作台上。因此, 必须使用柔性联轴器来联接电机轴与丝杠, 以消除以上误差对伺服进给机构运动精度的影响。膜片联轴器通过挠性钢片传递转矩, 具有角向、轴向、径向位移补偿能力以及减震作用, 能很好的消除通过电机轴传递来误差。因此, 我们采用膜片式联轴器来联接电机与丝杠。

5 结 论

在设计超精密车床的伺服进给机构过程中, 考虑各项误差源对伺服进给机构运动精度的影响, 从机械结构角度提出消除或减小这些误差的措施, 这些措施主要有: ①机床的伺服进给机构系

统用大理石作为主体材料; ②利用复合节流方式的气体静压导轨以增加系统的静刚度; ③在丝杠与工作台联接之间安装浮动单元以消除传动链上的误差对伺服进给机构运动精度的影响。最后经

测试, 伺服进给机构的运动精度完全达到要求, 符合超精密加工的要求。

参考文献:

- [1] 胡志勇. 复合节流型超精密空气导轨的试验研究[D]. 北京: 航空工业部 303 所, 1989.
- [2] 杨辉. CNC 超精密平面磨床关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.
- [3] 袁哲俊, 王先逵. 精密与超精密加工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [4] 汪建新, 等. 影响超精密车床加工精度的因素及其对策[J]. 航空精密制造技术, 1998, 34(2): 58-61.

Design of servo-feed mechanism of ultra-precise lathe

DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang

(*School of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: The paper analyses the error sources which contribute to the kinematic accuracy of servo-feed mechanism of ultra-precise lathe. On the basis of this, this paper brings on some methods for eliminating the error source by modifying machine structure of the servo-feed mechanism instead of increasing the manufacturing accuracy of the lathe s components. Those methods mainly include applying multi-throttle air-lubricated hydrostatic slide guide and mounting a float unit on the screw pair. After applying those methods to the servo-feed mechanism of the ultra-precise lathe, the kinematic accuracy of the servo-feed mechanism can meet the requirements of ultra-precise Machining.

Key words: ultra-precise machining; air-lubricated hydrostatic slide guide; multi-throttle; float unit

作者简介: 戴一帆(1966-), 男, 上海市人, 副教授, 博士。莫斯科航空学院毕业, 主要从事精密工程领域的研究工作, 发表论文 10 多篇。