

超精密加工机床及其新技术发展*

李圣怡, 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: 介绍了超精密加工技术、应用背景、发展动向以及超精密加工关键技术的一些最新成果。从超精密加工技术推广应用的角度阐述了其精度目标、模块化、廉价化发展趋势, 同时就如何发展超精密加工技术全面介绍了目前机床模块化部件、传动系统、检测环节、数控系统和环境控制等领域的最新研究水平和成果。

关键词: 超精密加工; 机床; 超精密数控; 误差检测

中国分类号: TH161, TH-39 **文献标识码:** A

Ultra-precision Machine Tools and Development of the Latest Technology

LI Shen-yi, DAI Yi-fan, PENG Xiao-qiang

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper describes ultra-precision machining technology together with its application background and the latest development of its key points.

The accuracy target and the trend of modularization and low cost are described in detail from the view of spreading application of ultra-precision machining technology. Under the consideration of promoting technology level, the latest achievements in some key technologies are reviewed. These key technologies include modular component, actuating system, measurement technology, CNC system and environment controlling.

Key words: ultra-precision machining; machine tools; ultra-precision numeric control; error measurement

1 超精密加工技术的特点

超精密加工目前尚无统一的定义, 在不同历史时期、不同的科学技术发展水平的情况下, 有不同的理解。通常我们认为被加工零件的尺寸精度和形位精度达到零点几微米, 表面粗糙度优于百分之几微米的加工技术为超精密加工技术。

超精密加工技术是以高精度为目标的技术, 它必须在综合应用各种新技术, 在各个方面精益求精的条件下, 才有可能突破常规技术达不到的精度界限, 达到新的高精度指标。实现超精加工的主要条件应包括以下诸方面的高新技术: (1) 超精密加工机床与装、夹具; (2) 超精密切削刀具, 刀具材料, 刀具刃磨技术; (3) 超精密加工工艺; (4) 超精密加工环境控制(包括恒温、隔振、洁净控制等); (5) 超精密加工的测控技术。

80年代, 美国 Union Carbide 公司、Moore 公司和美国空军兵器研究所等制定了一个以 $0.1 \mu\text{m}$ 形状精度、加工直径为 800 mm 的大型球面光学零件超精加工为目标的超精密车床研究计划——举世闻名的 POMA (Point One Micrometer Accuracy) 计划。该计划所产生的影响十分深远, 其指标至今也尚未过时, 90年代日本学者在此基础上提出了今后努力要达到的目标值, 如表 1 所示。

美国 LLNL 实验室开发了一系列超精密实验研究型机床, 1984 年研制成功的大型光学金刚石车床 LODTM 是迄今为止精度最高的大型超精密机床^[1]。该机床可加工直径为 2.1 m、重 4.5 t 的工件。采用高压液体静压导轨在 $1.07 \text{ m} \times 1.12 \text{ m}$ 范围内直线度误差小于 $0.025 \mu\text{m}$ (在每个溜板上装有标准平尺, 通过测量和修正来达到), 位移误差不超过 $0.013 \mu\text{m}$ (用氦屏蔽光路的激光干涉仪来测量和反馈控制达

* 收稿日期: 1999-10-28
基金项目: 国家部委项目资助
作者简介: 李圣怡(1946), 男, 教授, 博导。

到)。主轴溜板运动偏摆小于 0.001 rad/s (通过两路激光干涉仪测量, 压电陶瓷修正来实现)。激光测量系统有单独的花岗岩支架系统不与机床联接, 油喷淋冷却系统可将油温控制在 20 ± 0.0025 。采用摩擦驱动, 推力可达 300 磅(136 kg), 运动分辨率达 $0.005 \mu\text{m}$ 。是超精密加工设备的典型代表。

表 1 POM A 计划的精度目标值和今后的精度目标值

Tab. 1 The accuracy target of POM A plan and the future accuracy target

误差原因	今后的目标精度(μm)	POMA 计划值(μm)
位置检测精度	0.005	0.05
定位精度	0.005	0.01
偏摆、俯仰、摇摆	(0.05 rad/s)	0.02
直线度	0.02	0.02
轴向跳动	0.005	0.02
径向跳动	0.005	0.02
主轴延伸	0.025	0.05
主轴驱动	0.01	0.01
热影响	0.025	0.05
工件装夹	0.025	0.05
形状综合精度	0.05	0.1

2 超精密机床关键单元的新技术与新进展

2.1 气浮主轴及气浮/液浮导轨系统新技术

气浮主轴的最大优点是回转精度高。由于气浮误差均化效应, 通常主轴回转运动精度比主轴加工的圆度精度要高出 5~10 倍。主轴与电机采用一体化结构直接驱动。电机与主轴的动平衡问题, 电机电磁振动消除、电机热消除、主轴热伸长补偿以及新型气浮结构与制造等都是一直在研究改善的问题。例如:

- 加装热管冷却系统是解决主轴热伸长的有效方法。热管是封闭金属管内工作流进行相变产生的“热泵”作用, 使它的导热率高出金属的上百倍, 因此它是加快热源冷却的一种好方法。该方法也开始在超精密主轴系统上运用。

- 为了进一步提高回转精度和刚度, 近年来很多人研究控制节流量反馈方法来实现运动的主动控制。最近, 用电磁技术和气浮结合的控制方案也在研究之中。但电磁技术的缺点很多, 如热效应严重等, 还不能达到很高精度。日本学者^[2]研究了一种用永磁体加压电陶瓷微位移驱动和电容传感器位置测量的方法来改善气浮主轴的精度。该方法采用重复学习控制在 600 rad/min 时, 回转误差由 31 nm 下降到 10 nm ; 在 9000 rad/min 时, 由 33 nm 下降到 9 nm 。主动控制增加了系统的复杂程度和降低了可靠性, 目前尚不到实用的程度。用永磁体增加止推气垫的刚度的成功实例并不少见, 这种气磁轴承和加开真空负压槽的真空吸附加强型气浮轴承相似。这种综合轴承在一定程度可改善气浮轴承的动态特性, 如增大阻尼。

- 气浮轴承国内多采用小孔节流方式, 国外多孔材料用于气浮轴承也有很好的例子。例如德国慕尼黑大学采用了一种由微铜球烧结而成的多孔质材料来制造气浮垫。俄罗斯采用一种尿脞发泡多孔陶瓷制造气垫, 为了改善其加工性和刚度在气垫表面镀上镍(Ni)层, 然后进一步加工。多孔材料的气浮轴承可以提高气浮轴承的刚度。美国 Portec North 公司开发的 Metapor F 100Al 材料是 70%~90% 的铝粉和 10%~30% 的环氧树脂通过真空成形或加热成形。Wisconsin-Madison 大学开发的多孔质材料是用氧化铝和二氧化钛粉末通过特殊工艺制成的复合陶瓷材料^[3]。

- 液体静压轴承与气体静压轴承比较, 具有承载能力大, 阻尼大, 动刚度好等优点, 主要的缺点之一是对油温控制有较高的要求。近年来温度控制技术的水平有很大的提高。由于测温元件(如晶体温度传感器, 测量分辨率可达 0.001 ^[4]) 的灵敏度提高, 油温控制到 0.01 是不困难的。

2.2 超精密驱动技术的新进展

为了获得高的运动精度和运动分辨率,超精密导轨直线运动的驱动对伺服电机的要求很高,既要求有平稳的超低速运动特性,又要有大的调速范围,好的电磁兼容性。美国 Parker Hannifin 公司的 DM 和 DR 系列直接驱动伺服执行器,输出力矩大,位置控制分辨率高(64 万分之一)。主轴驱动电机可以采用印刷板电机,它的惯性小,发热量小。俄罗斯学者也曾采用飞轮惯性储能高速主轴。在加工过程中驱动电机及传动机构是与主轴脱离的,主轴只是靠惯性运转。这种方法可以用于一些特殊场合。

精密滚珠丝杠是超精机床目前采用的驱动方法,但丝杠的安装误差、丝杠本身的弯曲、滚珠的跳动及制造上的误差、螺母的预紧程度等都会给导轨运动精度带来影响。通常超精密传动机构应特殊设计,例如丝杠螺母与气浮平台的联接器是高轴向刚度,而水平、垂直、俯仰和偏转四自由度无约束的机构,电机与丝杠的联接器采用纯扭矩、无反转间隙的联接器。

气浮丝杠和磁浮丝杠可进一步减小滚珠丝杠的跳动误差和因摩擦和反向间隙引入控制系统的非线性环节。如俄罗斯研制了气浮/磁浮丝^[5],据报道电磁丝杠的传动主要指标如下:

丝杠直径 62 mm,螺距和螺纹齿高 4 mm,丝扣宽度 1 mm,间隙 $\delta = 0.1 \mu\text{m}$,承载能力和静刚度分别为 700 N、75 μm ,和气浮平台联合使用时驱动装置的分辨率为 0.01 μm 。

直线电机适合于高速和高精度的应用场合^[6],通常高速滚珠丝杠可在 40 m/min 的速度和 0.5g 加速度情况下工作,而直线电机加速度可达 5g,其速度和刚度都分别可大于滚珠丝杠的 30 倍和 7 倍。目前 Indramat 和 Anorad 公司是最主要的制造商。Indramat 宣称其直线电机传动定位精度为 0.04 μm ,分辨率为 0.01 μm ,速度可达 200 m/s。直线电机用于超精机床首选的是发热量小的永磁电机。永磁电机的缺点是磁场强;装配和拆卸不方便,很容易吸引切屑和其他金属碎屑,机床结构也要随之改变。所以,目前直线电机主要用于半导体行业、印刷电路板制造设备、激光加工水喷射切削等高速轻载的设备上。除此之外,直线电机采用无机械减速系统的直接驱动方式,电机的特性对运动平台的动态特性影响极大,在控制上很多人正在研究新的方案。

2.3 开发新摩擦驱动技术

摩擦驱动技术广泛用于精密机构的传动中,是因为摩擦驱动具有运动平稳、无反向间隙等特点。超精密机床及机构要求超低速高分辨率并且一般都是轻载的,非常适合使用摩擦驱动方式。

通常,将电机的转动变为溜板的平动所采用的摩擦驱动装置类似于齿轮齿条副传动。这种方式运动分辨率有限,因为其等效导程等于主动摩擦轮的周长。如果把摩擦副的主动轮与从动杆母线交角从 90 减小到一很小的角度,形成的摩擦副称为扭轮摩擦副,则可以得到很小的导程,例如我们研制的扭轮摩擦驱动系统如图 1 所示。它由一气浮平台和一扭轮摩擦驱动系统所构成,其导程可小于 0.2 mm,在 250 mm 范围内,其运动分辨率可达 nm 级,定位精度优于 10 nm^[7]。

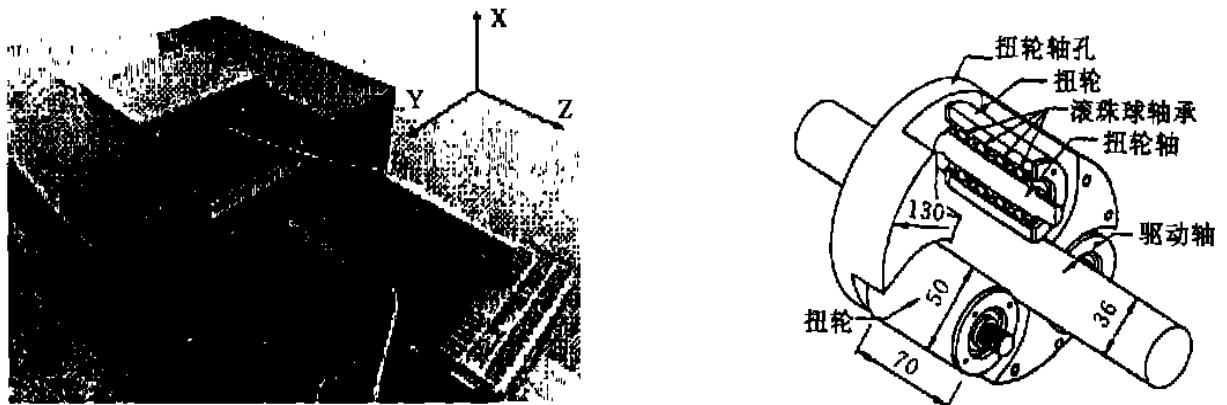


图 1 扭轮摩擦驱动系统

Fig. 1 Twist-roller friction drive system

2.4 超精密加工的检测、误差建模与补偿技术

双频激光干涉仪测量精度高,测量范围大,因此常用于超精密机床作位置测量和位置控制测量反馈元件。但激光测量的精度与空气的折射率有关,而空气折射率与温度、湿度、压力、二氧化碳含量等有关。美国 NBS 研究的结果说明,当前双频激光干涉仪其光路在空气中进行了各种修正与补偿,其最高精度为 8.5×10^{-8} 。由于这种测量方法对环境要求过高,要保证高精度,激光光路必须是在恒温氦气(或真空)保护下,这样的要求对实际生产来说往往过于苛刻,很难加以保证。

近年来光栅技术得到了很大的发展,衍射扫描干涉光栅采取偏振元件相移原理或附加光栅(index grating)相移原理。例如德国 Heidenhain 公司采用三光栅系统原理和四光栅系统原理的光栅尺可达到很高的分辨率,又有很好的可安装性^[8]。

这种光栅尺的光栅线周期为 128 nm,分辨率可达 1 nm,采用 Zerodur 材料制成,几乎是零膨胀系数($\alpha = 0 \pm 0.1$ ppm/K),动、静尺间隙为 (0.3 ± 0.1) mm,安装和使用都很方便。前面提及 Nanoform2500 和 ptimum2400 超精密车床都使用了 Heidenhain 的超精密光栅尺(也可根据用户需要安装 HP 的双频激光干涉仪)。

上述两种测量仪器,虽然精度高但是价格过于昂贵。炫耀光栅是种高精度、大范围的廉价测量仪器,炫耀光栅的定尺常刻成锯齿形条纹,(如 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 大小,每厘米 1000 线),而定尺为普通光栅尺,光栅常数为 $20 \mu\text{m}$ 。炫耀光栅的分辨率仅取决于细光栅,因此比较容易实现大范围、高精度的测量,是一种有前途的廉价化的光栅测量方式。

电容测微仪的特点是非接触测量,精度高、价格低。但是测量范围有限,测量稳定性差。美国 Lion Precision 公司的电容测微仪分辨率可达 0.5 nm (1 Hz 频响),热漂移每 0.04% 满量程。

小型化气浮导轨在制造上有一定难度。一种防旋转方型导轨的小型气浮测头装置在我们实验室试制成功。用这种测头可用来对工具和刀具进行精密测量。

最近日本学者研制的一种用于 CMM 微分测头^[9]测量力为 1 mN ,分辨率为 1 nm ,它是采用并行弹性悬架组成的复位机构,由两路正交半导体激光器,两个四象限光电二极管(QPD)和一个球形透镜组成,该装置可用于超精密机床上。

对于纳米级测量装置,一种用硅晶片和 X 线组成的衍射干涉仪可以得到亚纳米精密的位移测量。硅晶格常数约为 0.3 nm 。该系统可作标准位移测量仪器,测量的标准方差小于 $0.005 \text{ nm}^{[10]}$ 。

用变分法精度分析误差建模理论,可以将刀具几何参数,加工工艺条件及机床运动误差三大因素对加工工件的精度影响准确地建立数学模型。近年来一些数学工具,如微分几何、李代数和李群,用于复杂几何形状误差的评定和分析取得了一些成绩,有望在超精密机床误差分析中得到运用^[11]。但是,机床运动误差的精确测量是十分困难的。例如:每一维导轨溜板的运动都有 6 个自由度,要精确测量所有自由度的运动误差是非常复杂的。一种基于同心圆光栅的图像处理方法正在我们实验室开发,该系统预期能将溜板运动的非轴向平移的五个自由度误差一次测出,测量范围在 $20 \mu\text{m}$,精度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

多传感器误差分离方法可以用来对简化的机床主要运动进行测量。例如:对导轨误差补偿而言(特别是长导轨),静压导轨的运动公共覆盖区与导轨长度成反比,与溜板长度成正比。公共覆盖区域大,静压对误差的均载作用才大。由于溜板的运动精度有限,所以误差分离技术在直线度,平面度误差测量与补偿控制方面将大有用武之地。

2.5 超精密机床的数控系统

超精密机床数控系统的特点是具有高的编程分辨率(1 nm)和高精度的伺服控制软硬环境。

在高编程分辨率条件下满足高质量切削条件,意味着需要高的控制速度,例如插补周期小于 1 ms (普通数控为 10 ms 左右),伺服闭环采样周期小于 0.1 ms 。

(1)PC 机的发展给数控技术带来新的发展,PC 为基的数控系统已成为超精密数控的潮流。例如美国的 NANOPATH 和 PRECITECH'S ULTRAPATH TM 都是基于 DSP 的超精密数控系统。数据系统的硬件运动控制模块(PMAC)开发运用越来越广泛,使基于 PC 的数控系统的可靠性和可重构性得到提高。新的芯片(如 SERCOS)和网络协议的发展又给数控系统提供了一种分布网络式的新结构,使

其可靠性和开放性更好。日本的 Fanuc 公司 1999 年 1 月推出 Fanuc 15I, 与 Fanuc 15B 型数控系统比较, 其可控制的轴数从 8 个提高到 24 个, 插补数度由 $1\ \mu\text{m}$ 提高到 $1\ \text{nm}$, 插补速度提高了 8 倍, 可实现高精度轮廓控制(HPCC)和 NUTBS 插补功能。

我们针对超精密数控车床研制的 YH-1 型数控系统, 采用 ASW-824 工业一体化 PC 工作站, 用 ADSP2181 信号运算器模块构成高速下位伺服控制。采用 Microsoft Windows 3.1 平台。其数控软件的特点是:

- 超精密非球光学零件自动编程系统及标准库支持系统。
- 通常标准数据指令编程处理系统。
- 针对超精密加工可能出现大量微细程序段设计的基于双圆弧伸缩补偿法的超数插补功能 SPCI (Special Precision Curve Intevpolation) 和超精刀具半径补偿功能。可以实现 $1\ \text{nm}$ 编程分辨率和小于 $1\ \text{ms}$ 的插补周期。
- 基于陷波+前馈+PID 控制方法的超精密伺服闭环控制软件。

(2) 超精密数控机床不难实现高精度的定位精度, 即使在超精密概念下有一些非线性环节, 采用适当的控制算法(如非线性滑模控制等)都可以得到很高的定位精度。但是当机床作非直线运动时, 对指定轮廓曲线的控制精度(称为跟踪精度)还取决于机床各维运动的动态特性。因此, 要想得到高的跟踪精度就困难得多。一些适当的控制技术, 如解耦控制技术可以将多维运动参数加以解耦来提高跟踪精度。还例如, 最优预见控制(OPC)和逆补偿滤波器(控制 IKF)也是解决问题的有效方法。

(3) 开放性数控的研究, 如世界著名的 OSA CA、OMAC 和 OSE 等三个计划都取得了重大进展, 但目前还处于实验阶段。我们现在进行的研究着重于以下几点:

- 采用面向对象的分析方法对数控系统的功能重新进行规划;
- 采用虚拟机的概念描述数控系统;
- 采用构件化软件设计方法实现对虚拟设备重构;
- 建立结构模型以实现人机界面独立性。

由于网络技术的发展, 基于 PC 的数控系统也许只是一个过渡性技术, 基于网络的数控系统很快将要出现。

2.6 其它重要技术

超精密加工及超精密机床的环境控制技术, 包括恒温及热变形控制、隔振及振动控制、洁净度控制等。超精密加工的刀具以及工艺也要很高的要求, 超精密机床的材料和结构都有其特殊的要求。

3 我国超精密加工技术赶超世界先进水平的对策。

超精密加工技术的意义重大。通过多年的实践, 我们认为, 当前我国超精密加工技术的发展赶超世界先进水平的策略为:

(1) 优先考虑适度、稳定的高精度的战略

追求高精度从理论上是无穷尽的, 但根据我国国情, 选择适度的投入/精度之比, 追求适度、稳定高精度, 而不是盲目追求高指标。

(2) 依靠自己的力量开发廉价化的超精加工技术

例如: 加强基础部件的研究; 规划模块化设计; 重视系统化工艺与技术的开发等措施; 开发具有我国知识产权的超精加工技术是超精加工廉价化的基础。

(3) 加强测量与控制技术和其他新技术对超精密加工技术的渗透

当前电子、计算机、控制等技术的发展给超精密加工技术带来了“锦上添花”的机遇。加强与其他高新技术的综合与渗透是提高超精密加工水平的捷径。

参考文献:

- [1] Donaldson R R , Patterson S R. Design and Construction of a large, vertical axis diamond turning machine[R]. Lawrence Livermore National laboratory report. 1985.
- [2] XinCUI, Tetsuya, et al. A Combination of Air-spindle and Permanent Magnetic Bearing for Improved Motion Accuracy and Stiffness [R]. MECHATRONICS'98. 1998.
- [3] 机床信息, 北京机床研究所行业信息部, 1996, 1: 31.
- [4] 王宪平. 超精密直线度误差分离技术与研究[D]. 国防科技大学硕士论文, 1998.
- [5] 机床信息. 北京机床研究所行业信息部, 1997, 4: 20.
- [6] 机床信息. 北京机床研究所行业信息部, 1997, 4: 18、24.
- [7] 罗兵, 李圣怡, 李艾利. 超精密齿轮摩擦传动动力学研究[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(3).
- [8] A. Spies. Linear and Angular Encoders for the High-Resolution Range[A]. Proceedings of 9th IPES and 4th ICUM E, 1996: 54.
- [9] Tomoyuki Takamoto Development of the High Sensitive Probe for Coordinate Measuring Machine[R]. MECHATRONICS'98 1998.
- [10] Bowen D K. Sub-hanometre transducer characterization by X-ray interferometry[J]. J. of Precision Engineering, 1990, 12(3).
- [11] Gou J B , Chu Y X, Li Z X. Symmetric Localization and applications to form tolerance evaluation ASME[J]. J. of Manufacturing Science and Engineering, 1997.