

超精密加工技术讲义

(中国科学技术大学 叶回春 博士)

1 超精密加工技术

超精密加工主要有超精密切削、超精密磨削以及抛光加工，其加工精度可以达到亚微米量级的形状精度和纳米量级的表面粗糙度。特别是使用精密的天然单点金刚石刀具加工有色金属和非金属，可以直接切削出超光滑的加工表面，省去了研磨等手工精加工工序，不仅可以节省工时，还可以提高加工精度和加工表面质量，受到世界各国的重视，并得到迅速发展。

超精密切削之所以能达到如此高的加工精度，主要是因为超精密加工机床的关键精密技术的发展。这种技术包括高精密的主轴部件，机床床身布局的模块化、构件化，精密导轨部件，高精密度的进给驱动系统，纳米级激光在线检测系统，机床隔振与环境的控制等技术，这些关键技术的实现是超精密加工的先决条件。

在超精密加工中，超精密单点切削是一种重要的超精密加工技术。超精密车削技术也称“SPDT 技术”(Single Point Diamond Turning)，起源于 1962 年美国 Union Carbide 公司，该技术利用天然金刚石作为切削刀具，以及空气轴承作为主轴的超精密车床，成功将电解铜直接车削到镜面，而在计算机控制下切削出精密的光学元件表面是 80 年代开始，由美国国防研究机构率先开发，利用超精密数控金刚石车削技术，只要把非球面的方程输入计算机，再由机床数控系统根据计算机程序控制工件与金刚石刀具的相对运动，令金刚石刀具的刀尖刃口轨迹在工件上复合，可直接加工各种类型的高精度光学表面。

超精密车削技术最初主要应用于美国政府激光核聚变及军用光学装置中的金属反射镜的研制，随着人们对超精密车削技术认识的深入，该技术很快应用到红外非球面元件的加工，红外光学元件的传统加工是采用光学冷加工的方法，这种加工方法的缺点是加工步骤烦琐，周期长，抛光液对环境造成的污染大，加工镜片的一致性差，不利于批量生产的质量控制。超精密车削技术可以完全克服传统加工的弊病，利用金刚石车刀的单点车削，直接将红外材料（锗，硅等），加工到镜面，且面形满足红外各波段光学应用要求，显著提高了红外镜片的生产效率和精度。红外光学零件的超精密车削技术的发展，对国防工业发展具有新的里

程碑的意义：导弹红外成像制导反射镜，红外雷达反射镜，步兵及坦克夜视红外透镜等均为典型的红外光学曲面零件，利用超精密车削技术对其进行制造，其加工精度与重复加工精度比传统加工更高，从而提高了武器瞄准跟踪系统的性能。航天技术作为高新技术领域的前沿，对超精密车削技术的需求和依赖性更为突出，新型航天系统更新换代大多是与超精密车削技术的突破分不开的：人造卫星仪器轴承要求真空无润滑，其孔和轴的表面粗糙度圆度和圆柱度均为纳米级精度，可采用超精密车削加工而成；超精密车削技术使 X 射线天体望远镜真正实现了大面积多目标的观测。在民用光学方面，与集成电路（IC）有关的硅片，用于聚光，具有阶梯微结构形状的二元光学元件，用于激光打印的多面体镜、用于磁盘基板的 HDD 装置，用于非球面或渐近多焦点眼镜片批量生产的模具，用于手机镜头、数码相机镜头的塑料模压的模芯，用于医疗的接触镜和内窥镜，都可由超精密车削而成。

超精密加工技术水平是现代高技术战争的重要支撑技术，是现代高科技产业和科学技术的发展基础，它反应了一个国家的装备制造水平，而超精密加工技术中最最重要的一个技术分支就是超精密车削技术。超精密车削技术在国防、民用工程制造技术中，具有举足轻重的地位。2001 年美国启动国家纳米科技推动方案（NNI），2002 年英国启动多学科纳米研究合作计划，2002 年日本启动纳米科技支撑计划，我国已经把“高档数控机床与基础制造设备”列为《国家中长期科学和技术发展纲要》确定的国家科技重大专项之一。该专项的目标是：到 2020 年，我国将形成高档数控机床与基础制造设备的自主开发能力，部分技术水平进入国际先进水平，部分产品国际领先。因此，在我国的十二五重点项目研究规划中，超精密车削技术的研究无可厚非的占据一席之地。

本章就超精密加工机床的关键技术、超精密单点切削加工技术等分别进行讨论。

1.1 超精密加工机床的关键技术

超精密加工机床是实现超精密加工的首要基础条件，随着加工精度要求的提高和超精密加工技术的发展，超精密加工机床也获得了迅速发展。超精密加工机床的质量，取决于机床关键部件的质量和关键技术的水平。世界各国都非常重视这个问题，投入了大量人力物力，对超精密加工机床的关键部件和关键技术进

行了研究。影响超精密加工机床加工精度和加工能力的关键部件和关键技术主要包括以下几个方面:机床精密主轴部件、床身和精密导轨部件、进给驱动系统、机床运动部件的位置在线检测系统、机床数控系统、机床隔振及环境控制系统,机床加工误差的检测与补偿技术。

1.1.1 超精密主轴部件

精密主轴部件是超精密加工机床保证加工精度的核心,主轴部件性能的好坏直接关系到加工工件精度的高低。因而,不仅要求主轴达到极高的旋转精度、转动平稳、无振动,而且对其刚度、热膨胀性、加工装配等都有很高要求。早期的精密主轴采用超精密的滚动轴承,机床精度可达 $1\ \mu\text{m}$ 。制造如此高精度的滚动轴承很不容易,要进一步提高主轴精度,继续采用滚动轴承很难办到。在液体静压轴承和空静压轴承出现后,超精密加工机床的主轴已经不再使用滚动轴承了。

液体静压轴承的回转精度很高 ($0.1\ \mu\text{m}$),转动平稳,同时刚度也较大,能承受较大的载荷,因此有的超精密加工机床也用液体静压轴承作为超精密主轴。但是液体静压主轴在转动时常产生较大的温升,而且转速不同,温度升高值不等,要控制恒温较难。温度升高产生变形,会影响主轴精度。另外,静压油回油时,将空气带入油源,形成微小气泡悬浮油中,不易排出,将降低轴承的刚度和动力特性。

基于上述原因,在 20 世纪 60 年代开始使用具有静压空气轴承的主轴部件。由于空气的粘性小,静压空气轴承具有以下优点:摩擦力小、温升小,能在极高转速下工作;回转精度高、磨损率小,可在极高、极低温度下工作;噪声振动小、寿命长。在高速转动下温升小,因此造成的热变形误差很小,空气轴承的应用促进了超精密加工机床制造技术的迅速发展。空气轴承的主要问题是刚度低,只能承受较小的载荷。但是由于超精密切削时,切削力很小,空气轴承能够满足要求,故在超精密加工机床中得到了广泛应用。

图 1-1 是 Nanoform 200 型超精密加工机床主轴的空气静压轴承的示意图。一定压力的空气经过节流小孔进入轴承耦合面的气腔,轴由高压空气支撑,浮在轴套内,不产生刚性固体接触,没有摩擦。轴的中心位置由相互对称的静压空气压力维持。当主轴受力偏歪时,耦合面的间隙发生改变,造成气腔中的气压不等,

气压差将推动主轴回到正确的中心位置。由于空气的流动性很好，因此轴承两耦合面间（轴与套之间）的空气楔间隙很小，单边间隙只有 12~14 μm 。由于这种轴承的轴与套之间的间隙很小，回转精度要求又很高，所以轴与轴套的制造精度要求也很高，轴的圆度误差要求达到 0.25 μm ，径向轴承和止推轴承之间的垂直度要求达到 2.5 μm 。

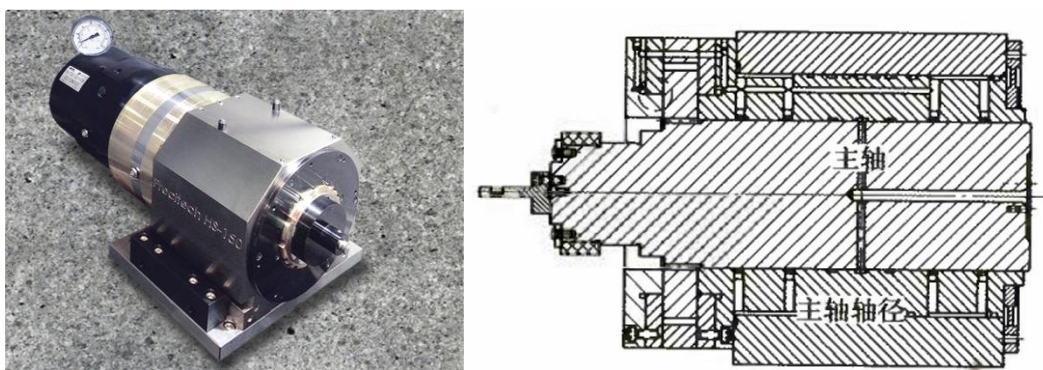


图 1-1 Nanoform 200 型超精密加工机床主轴的空气静压轴承

主轴的驱动方式直接影响超精密加工机床的回转精度，因此设计主轴时应给予足够的重视。超精密加工机床主轴的驱动方式主要有以下三种。

(1) 电动机通过带传动驱动。早期的超精密加工机床都采用这种驱动方式，其电动机选用直流电动机或交流变频电动机。这两种是无级变速电动机，不用齿轮传动变速，减少了振动源。电动机制造时，转子经过精密动平衡，并采用单独地基，避免电动机振动传递到超精密加工机床主体。传动带采用柔软的无缝的丝质材料制成。带轮有自己的轴承支撑，经过精密动平衡，通过柔性联轴器与机床主轴相连。采取上述措施使得机床主轴尽可能隔离振动。

(2) 电动机通过柔性联轴器驱动。采用这种方案时，电动机和机床主轴在同一轴线，通过电磁联轴器或者其他柔性联轴器与机床主轴相联。这种驱动方式比带传动结构要紧凑得多，同样电动机也要进行精密动平衡，尽量减少振动，提高主轴回转精度。采用这种驱动方式，主轴部件的长度较长，机床的尺寸较大。

(3) 电动机通过特制内装式同轴驱动。电动机轴即机床主轴，亦称“电主轴”。电动机的转子直接安装在机床主轴上，而定子装在主轴箱内。电动机本身没有独立的轴承，而是和机床主轴的高精度空气静压轴承合二为一。电动机多采用无刷直流电动机，可以方便地实现主轴的无级变速。这种无刷电动机，不仅可以消

除电刷引起的摩擦振动，而且可以消除电刷磨损对电动机运转的不利影响。为了使主轴的回转精度尽可能地高，转子必须进行精密的动平衡。装配时，转子和定子必须达到严格的同轴度要求，它们之间的间隙也必须十分均匀。采用内装式同轴电动机驱动的机床主轴存在的一个主要问题是：电动机工作时，定子将发热导致温度上升，使主轴部件产生热变形。因此，应该采取强制通气冷却电动机定子，或者将定子外壳做成夹层，通入恒温油（或水）冷却。采取以上措施，基本可以解决内装电动机的发热问题。电动机做成内装式的，不仅可以提高机床的主轴回转精度，而且也可以缩短主轴箱的长度，将主轴箱设计成为一个独立的、移动十分方便的部件。这种形式的主轴，在超精密加工机床中已被广泛采用。

图 1-2 是 Nanoform200 型超精密机床内装式电主轴的结构示意图。无刷直流电动机的轴颈与静压空气轴承的轴颈同轴度要求达到 $5\ \mu\text{m}$ 以内，并且采用强制水冷的方式，使电动机的定子保持恒温。

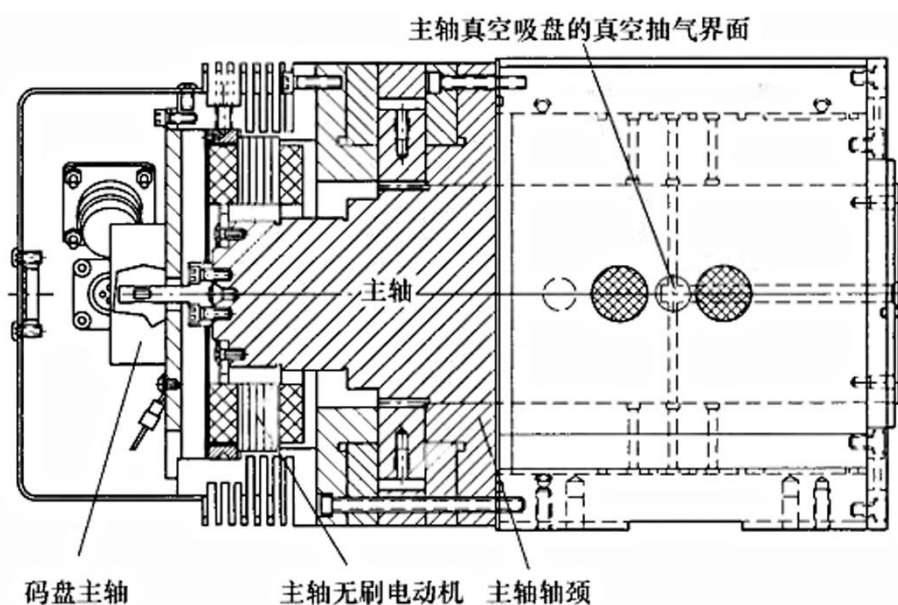


图 1-2 Nanoform 200 型超精密机床内装式电主轴结构示意图

1.1.2 机床床身布局与精密导轨部件

1.1.2.1 超精密加工机床的布局

超精密加工机床的总体布局对其性能的好坏起决定性的影响。超精密加工机床与传统微纳机床或者精密机床相比，在结构布局上有很大不同。模块化、构件化是超精密加工机床进入市场的重要技术手段，如美国摩尔公司生产了各种主轴、

导轨和转台，用户可根据各自的需要组成一维、二维甚至多维的超精密运动控制平台或机床。

普通机床和精密机床的 Z、X 向的导轨都集中在工作台（或溜板）上，形成十字滑板。主轴箱固定，刀架装在十字滑块上，通过控制刀具的移动来实现加工。十字滑板布局的上下导轨不仅要求有很高的直线运动精度，而且要求两者有很好的垂直度，否则下滑板的运动误差将影响上滑板的运动精度。这种结构对普通机床和精密机床而言，基本可以满足要求，但是要满足超精密加工机床更加严格的运动精度要求非常困难。

为了提高超精密加工机床导轨的运动精度，超精密加工机床通常采用双频激光干涉仪对 Z、X 方向移动的位置进行实时检测。如果采用十字滑块机构，其中有一路双频激光干涉仪，必须装在移动的十字滑块上，这必将降低测量精度；同时，由于双频激光干涉系统有一定的体积，整个工作台系统的体积也会增加。当然，采用十字滑块结构的最大优点是主轴箱位置固定不动，因此主轴用带传动时，电动机可以有单独的地基，从而能够减少电动机的振动对主轴的影响。

超精密加工机床的主轴通常采用内装式的同轴电动机驱动，没有带轮和单独的电动机基座，主轴箱可以成为移动的整体部件，这样超精密机床就可以采用 T 形结构形式布局了。T 形结构形式布局是指机床的 X、Z 向导轨不再做成叠加式的十字滑块结构，而是做成分离式的结构，即机床的 X、Z 向导轨都做在机床的床身上，构成 T 形布局，两个导轨可以基本在同高度。这种布局有利于提高导轨的运动精度。检测 X、Z 向运动位置的双频激光干涉仪可以直接安装在固定不动的床身上，只有测量位置用的反射镜装在 X、Z 向的移动部件上。这不仅使测量系统安装简单，而且还可以大大提高测量精度。Nanoform 200 型超精密机床的导轨 T 形布局示意图如图 1-3 所示。横向运动（X 向）由主轴箱完成，纵向运动（Z 向）由刀架完成。

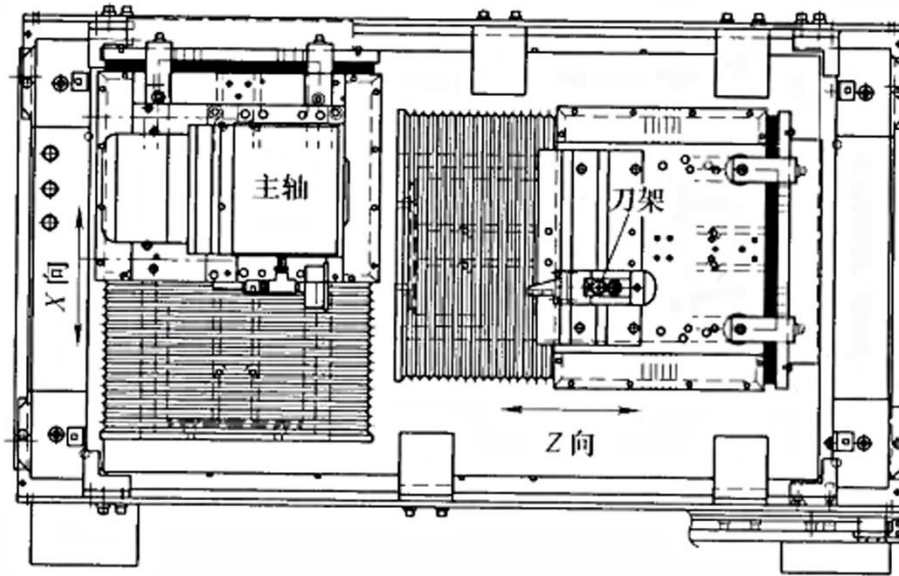


图 1-3 Nanoform 200 型超精密机床的导轨 T 形布局示意图

1.1.2.2 床身和导轨材料的选用

铸铁是传统的制造床身和导轨的材料，其优点是工艺性好。选用耐磨性好、热膨胀系数低、振动衰减能力强，并且经过时效处理、消除内应力的优质合金铸铁做精密机床的床身和导轨，可以得到满意的效果。尽管在某些超精密加工机床上仍然采用铸铁，但大多数的超精密加工机床都改用花岗石来做床身。与铸铁材料相比，花岗石具有尺寸稳定性持久、热膨胀系数低、对振动的衰减能力强、耐磨性好、不易生锈等优点。花岗石的主要缺点是它的吸湿性，吸湿后会产生微量变形，影响精度。为了解决这个问题，瑞士 Studer 公司制造了人造花岗石。

1.1.2.3 导轨形式的选用

滚动导轨在普通机床和精密机床中应用较多，近来滚动导轨技术的提高，使其应用面又得到扩大。滚动组件摩擦因数小，能制成具有较高精度，适合在普通机床和精密机床中做导轨。滚动导轨的直线运动精度已经达到 $1\mu\text{m}$ ，要进一步提高精度很不容易。因此超精密加工机床大多采用更高精度的液体静压导轨、气体静压导轨以及气浮导轨等。下面对这几种形式的导轨做简单介绍。

液体静压导轨是将一定压力的油液经节流器输送到导轨面的油腔，形成承载油膜，将互相接触的金属表面隔开，实现液体摩擦。图 1-4 所示为纽莫公司制造的一款超精密加工机床的静压油导轨。其主要优点是：摩擦因数小，机械效率高；

导轨面之间建立起一层很薄的油膜，油膜具有良好的润滑性和吸振性。因此，静压导轨比其他滑动导轨和滚动导轨的寿命提高许多倍，甚至长期使用都不会磨损，且工作运动平稳，相对运动速度的变化对油膜厚度和刚度的影响较小，消除了工作台低速运动的“爬行”现象。

图 1-5 所示为平面型液体静压导轨的结构示意图。导轨的运动件上下、左右面都在静压油的作用下，可以保证很高的运动精度、刚度。液体静压导轨的缺点是，会产生一定的温升，由于超精密加工机床导轨的运动速度要求不是很高，液体静压导轨的温度升高不太严重，而且液体静压导轨刚度高，能承受较大的载荷，所以很多超精密加工机床(如普瑞思泰克的 Nanoform 200 与 Nanoform 705G 等)都采用液体静压导轨。

气浮导轨和空静压导轨在精心制造时，可以得到很高的直线运动精度，且运动平稳、无爬行、摩擦因数接近于零、不发热，因此在超精密加工机床中也得到了较好的应用。气浮导轨和平面型空气静压导轨的结构示意图分别如图 1-6、图 1-7 所示。从图中可以看出，工作台是靠气浮作用浮起的，但侧面有气体静压作用，属气体静压导轨。气浮导轨的刚度低于空静压导轨，且受压缩空气引压波动的影响。在压缩空气高度稳定时，气浮导轨可以得到较高的直线运动精度，美国纽莫公司的 MSG325 型超精密加工机床就是使用气浮导轨的。对于空气静压导轨，其运动件的导轨面的上下、左右均在静压空气的束缚下，因此与气浮导轨相比具有较高的刚度和运动精度。



图1-4 超精密加工机床的静压导轨

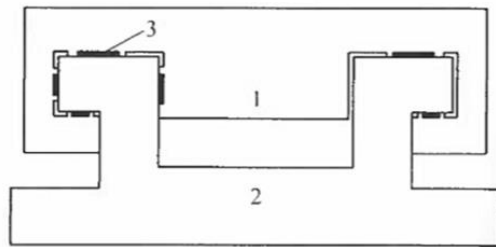


图1-5 平面型液体静压导轨结构示意图
1.移动工作台 2.底座 3.静压油

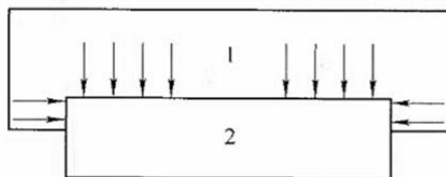


图1-6 气浮导轨结构示意图
1.移动工作台 2.床身底座

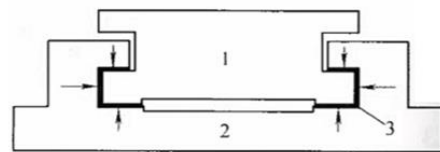


图1-7 平面型空气静压导轨结构示意图
1.移动工作台 2.底座 3.静压空气

1.1.3 高精密度的进给驱动系统

超精密加工机床为了实现超高精度的加工，要求必须具备超高精度的进给驱动系统与之相互匹配。在普通机床、精密机床和以往的超精密加工机床上，大多采用滚珠丝杠、液体静压丝杠和摩擦驱动等手段，作为机床的进给驱动系统。随着直线电动机技术的发展和日趋成熟，超精密加工机床大多采用直线电动机作为进给驱动系统。例如：Nanoform20 超精密机床就采用三相交流直线电动机作为 X、Z 向的进给驱动系统，并采用分辨率为 2.5nm 的激光干涉系统，实时测定机床 X、Z 向的进给运动位置。

直线电动机是一种将电能直接转换成直线运动机械能的电力装置。由直线电动机直接产生直线运动，这种方式最简单也最理想，其传动环节少，不需要由旋转电动机经丝杠来转换，没有传动间隙（包括反向间隙）。与传统的伺服电动机通过滚珠丝杠得到直线运动相比，直线电动机具有很多优点，如起动推力大、传动刚度高、动态响应快、定位精度高、精度保持时间长、运动速度范围宽、行程长度不受限制等。特别是直线电动机无离心力结构，其直线运动速度不受限制。

直线电动机与旋转电动机的原理相同，将旋转电动机沿其径向展开成为直线电动机。图 1-8 为直线电动机的工作原理示意图，其中定子相当于直线电动机的初级，转子相当于直线电动机的次级。当在初级中通入三相正弦电流时，在初级之间的气隙中就会产生磁场，由于这个磁场是平移的，不是旋转的，故称行波磁场；在行波磁场与次级的相互作用下，产出电磁推力，从而使次级产生直线运动。

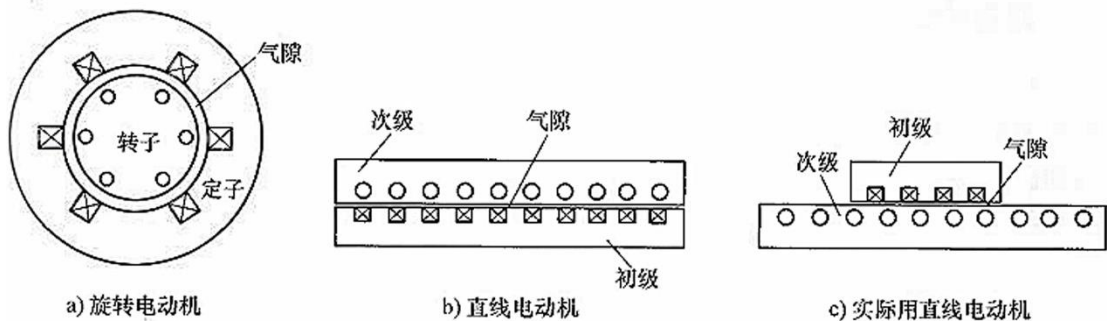


图 1-8 直线电动机工作原理示意图

1.1.4 机床运动部件位移的纳米量级激光在线检测系统

为了实现高精度的进给和保证极高的加工精度，超精密加工机床通常配备有位移激光实时检测系统。机床运动部件的位移实时检测与精密数控系统组成精密反馈控制系统，以保证加工的尺寸精度。图 1-9 所示为美国组莫公司制造的 MSG-325 型超精密金刚石车床的位移激光实时检测系统，双频激光测量系统采用美国 HP 公司生产的 HP5501 型双坐标双频激光干涉测量系统。该机床的布局为 T 形布局，主轴箱装在纵溜板上作 Z 向运动，刀架装在横溜板上作 x 向运动。双频激光发生器发出的激光经分光镜分成两路，分别测 Z 向和 X 向的位移。激光测量系统的分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 。为了避免激光器发热的影响，激光器用支架支撑，放在花岗岩床身的后侧面。测量系统除移动的测量反射镜是安装在移动部件上随主轴箱和刀架移动外，其余整个测量系统是固定安装在花岗岩床身上。这样 Z 向和 X 向的测量互不干扰，有利于提高测量精度。测量光路安放在主轴轴线的高度上，以减小阿贝误差。

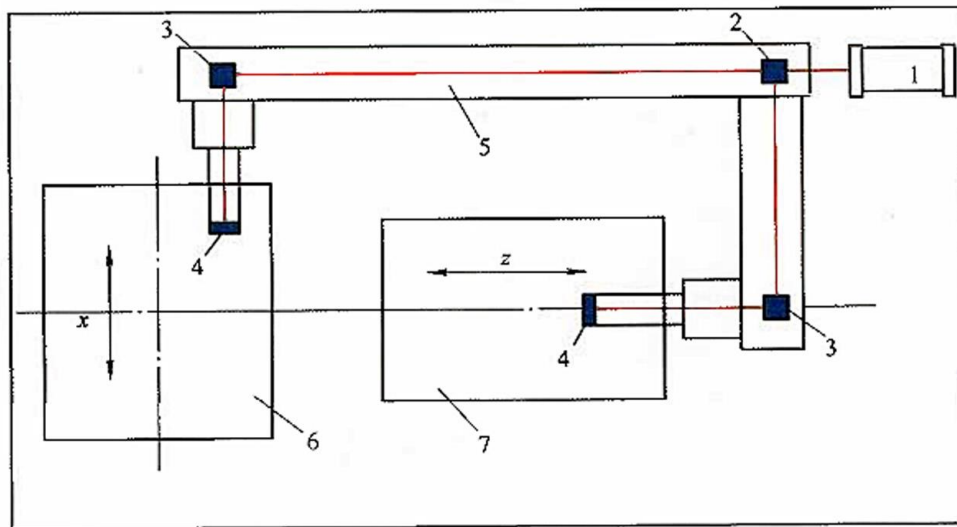


图 1-9 超精密金刚石车床的位移激光实时检测系统 (MSG-325)

1. 激光器
2. 分光镜
3. 反光镜
4. 移动棱镜
5. 封闭罩
6. 横滑板
7. 纵滑板

1.1.5 超精密加工机床的数控技术

超精密加工机床要求其数控系统具有高编程分辨率 (1 nm) 和快速插补功能 (插补周期为 0.1 ms)。基于 PC 机和数字信号处理芯片 (DSP) 的主从式硬件结构是超精密数控的潮流，如美国的 NANOPATH 和 PRECITECH'S ULTRAPATH™

都采用了这一结构。数控系统的硬件运动控制模块（PMAC）开发应用越来越广泛，使此类数控系统的可靠性和可重构性得到提高。在数控软件方面，开放性是一个发展方向。国际上，有欧盟的 OSACA、美国的 OMAC 和日本的 OSEC 等都相继展开有关开放性数控系统的研究。

1.1.6 机床隔振及环境控制系统

精密和超精密加工的工作环境是保证加工质量的必要条件，影响 I 作环境的因素主要有温度、湿度、污染和振动等。超精密加工机床采用金刚石刀具进行超精密切削时，要求切削过程极其平稳，不容许有任何微小振动。隔振和减振主要是减小机床内部的振动和隔离外界环境的振动。减小和隔离振动主要有以下几种方法。

（1）超精密加工机床的运动部件必须经过严格、精密的动平衡，消除或减少机床的内部振源。

（2）提高机床结构的抗振性，使用较大的机床床身，降低其自振频率。

（3）采用振动衰减能力强的材料制造机床的结构件，花岗石对振动的衰减能力大大高于钢铁材料，所以采用花岗石做机床床身和导轨最佳。

（4）振动源应尽量远离超精密加工机床，如室外机、液压泵等，应尽量远离超精密加工机床。如果不能远离，也必须采用单独的基座与之隔离。

（5）超精密加工机床必须采用单独基座，并在地基周围挖隔振沟，沟中使用吸振材料，防止外界振动的传入。

（6）使用空气弹簧，超精密加工机床都支撑在空气隔振垫上，如图 1-10 所示。空气弹簧可以隔离频率 1.5~2.0 Hz 的外界振动。

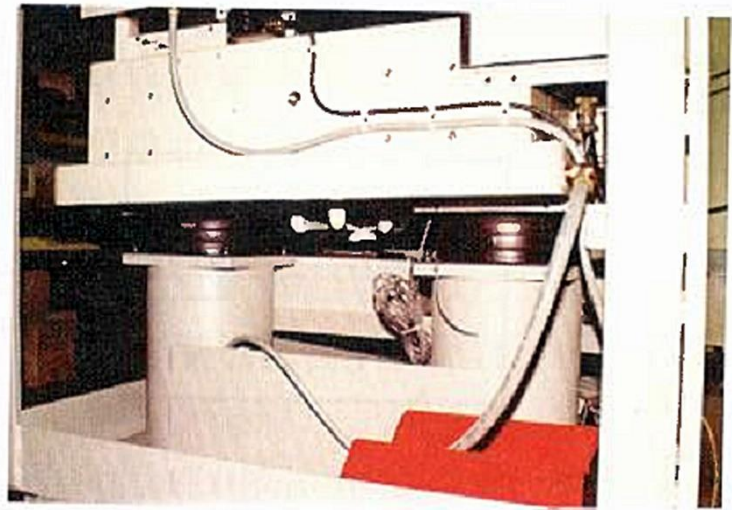


图 1-10 空气隔震垫

据有关文献统计，精密加工中机床热变形和工件温升引起的加工误差占总误差的40%以上，许多精密和超精密加工机床装有高精度的温控系统和热误差的自动补偿装置。环境温度可根据加工要求控制在 $\pm 1 \sim \pm 0.02$ °C，甚至达到 ± 0.0005 °C。在恒温室内，一般湿度应保持在55%~60%，防止机器的锈蚀、石材膨胀以及一些仪器如激光干涉仪的零点漂移等。减小机床热变形主要有以下措施。

(1) 尽量减少机床中的热源，如机床主轴用空气轴承代替液体静压轴承以减小发热量。

(2) 采用热膨胀系数小的材料制造机床部件，如花岗岩的热膨胀系数为 $(5 \sim 15) \times 10^{-6}$ ，采用花岗岩制造机床部件最佳。

(3) 加工前，超精密加工机床必须处于热平衡状态，使热变形量处于恒定。同时，在正式加工工件前，通常要经过很长时间的空运转，使其达到热平衡。

采用多层恒温套间，可逐步得到大恒温间、小恒温间，恒温控制的精度愈来愈高。例如可进一步采用局部恒温的方法，如恒温罩，恒温罩内还可用恒温液喷淋，进而达到更精确的温度控制。

1.2 单点超精密切削技术

1.2.1 单点金刚石超精密切削原理

理想状态下，采用圆弧刃单点金刚石刀具进行超精密切削加工时，在工件加工表面形成轮廓峰与谷，峰谷之间的距离为 h ，就是所谓的理论残留高度或者理

论粗糙度，如图 1-11a 所示， h 表达式如下：

$$h = \frac{F^2}{8R} \quad (1-1)$$

式中， F 为切削进给量， R 为刀具圆弧半径。

在实际超精密切削塑性金属时，主切削刃和前刀面的主要任务是去除金属。切削层在前刀面的挤压作用下发生剪切滑移和塑性变形，然后形成切屑，沿前刀面流出，如图 1-11b 所示。前刀面的形状直接影响塑性变形的程度、切屑的卷曲形式和切屑与刀具之间的摩擦特性，并直接对切削力、切削温度、切屑折断方式和加工表面质量产生显著影响。主切削刃是前刀面和后刀面的交线。实际上，前刀面和后刀面的交线不可能为理想直线，而是一微观交接的曲线。该曲线的形状可以近似用不同位置的法平面相交成的曲线的平均曲率半径来描述，称其为刃口半径 ρ 。切削时，刃前区的应力状态十分复杂，应力集中造成金属中位错集中，导致金属产生塑性变形和滑移分离，一部分金属成为切屑沿前刀面流出，另一部分金属经后刀面熨压留在已加工表面。因为两部分金属运动方向不同，必然使刀具切削口前金属呈拉伸状态，拉应力使刃前区金属的抗剪能力下降，在刀刃的直接作用下，金属产生滑移分离。刃口半径对切削过程有较大影响，刃口半径越小，应力越集中，变形越容易，切削力越小，加工表面质量越好。同时，刃口半径对切削力、切削温度和切屑变形系数都有不同程度的影响。因此，提高刀具的锋锐程度，可减小刀具对金属的挤压力，使金属的变形程度降低，减缓金属的冷作硬化，有助于提高切削过程的稳定性，改善加工表面质量和延长刀具的使用寿命。另外，切削层金属被该分流线分流为两部分：分流线以上的材料沿前刀面流出，分流线以下的塑形变形层被 O 点以下的切削刃熨压后成为已加工表面。经过熨压以后，切削刃下方的材料产生严重的压缩变形，对已加工表面质量产生直接影响。

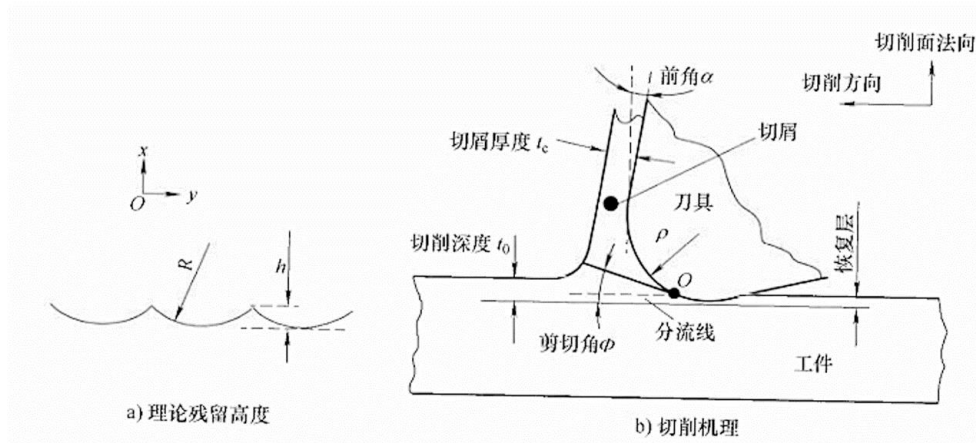


图 1-11 单点金刚石切削机理

从图 1-11b 可得出，超精密金刚石切削剪切角 Φ 与前角 α 的关系如下：

$$\tan \Phi = \frac{\cos \alpha}{\xi - \sin \alpha} \quad (1-2)$$

$$\xi = t_c / t_o \quad (1-3)$$

式中， α 为刀具前角， ξ 为切屑变形系数， t_c 为切削厚度， t_o 为切削深度。

试验证明，剪切角随着切削深度和工件结晶面的变化而变化，这说明在切削单晶体材料时，材料晶向对剪切角、切屑变形进而对切削力的影响是比较大的。

在超精密微量切削时，切削深度可以达到 $0.075 \mu\text{m}$ ，相当于从材料晶格上逐个去除原子。一般只有用天然金刚石刀具才能实现这一切削过程，并具有较高的耐用性。超精密加工采用微量切削，可以获得光滑而加工变质层较小的表面，吃刀量主要取决于刀尖刃口半径 ρ 的大小。金刚石刀尖刃口半径 ρ 理论上可以达到 3nm 。通常，我国生产使用的金刚石刀具中，刃口半径 ρ 为 $0.2\sim 0.5 \mu\text{m}$ ，经过特别精心研磨，其刃口半径 ρ 可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 。对加工表面质量有特殊要求时，特别是在要求残余应力和变质层很小时，必须进一步地减小刀尖刃口半径。

1.2.2 金刚石切削刀具的特性

超精密切削所使用的是天然单晶金刚石刀具，切削刃可磨得极其锋利。金刚石的硬度极高，其耐磨性好，热传导系数高，与有色金属间的摩擦因数低。在加工有色金属时，切削温度低，刀具耐用度很高，可以用很高的切削

速度（1~2 km/ min）长期切削而磨损甚小。

概括来说，金刚石切削刀具具有以下特征。

- (1) 极高的硬度、耐磨性和弹性模量，使刀具具有很长的寿命和很高的尺寸耐用度。
- (2) 刃口极其锋利，用单晶金刚石可以研磨得到极其锋利的刃口，刃口半径 ρ 值极小，可以小到 0.01 ~0.05 μm ，能实现厚度超薄的切削，没有任何其他材料可以刃磨到这样锋锐，并且能长期切削而磨损很小。
- (3) 切削刃无缺陷，切削时刃形复印在加工表面上，能得到超光滑的镜面。
- (4) 刀具和工件材料的抗粘结好，化学亲和性小、摩擦因数低，能得到极好的加工表面完整性。
- (5) 制造超精密切削刀具用的金刚石需要大颗粒（0.5~1.5Ct）优质（一级品）的单晶金刚石，如图 1-12 所示。

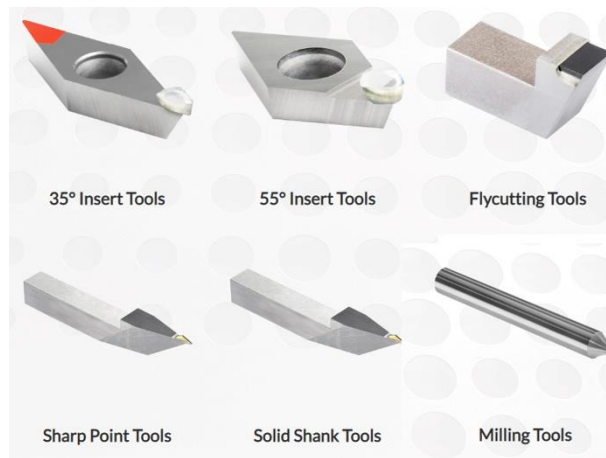


图 1-12 单晶金刚石刀具

1.2.3 切削参数对加工表面质量的影响

切削参数主要包括刀具几何参数和切削用量参数两方面：刀具几何参数有前角 α_0 、后角 γ 、主偏角 χ_1 、副偏角 χ_2 、过渡刃、刀尖弧度 θ 、刀尖圆弧半径 r 等，如图 1-13 所示：切削用量参数包括切削速度 v （主轴转速 w ）、进给率 f 、切削深度 d 。

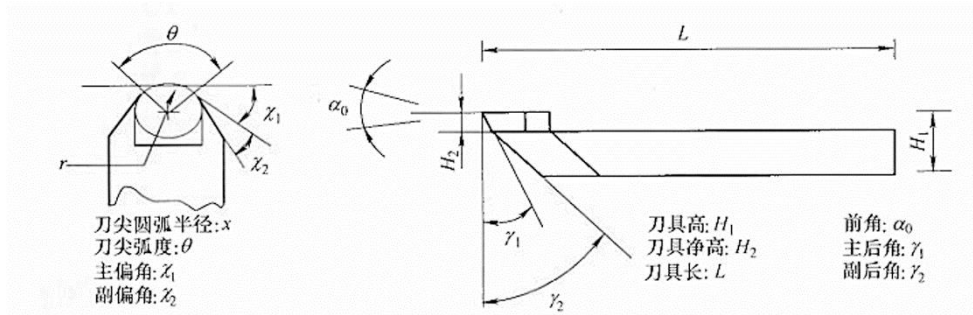


图 1-13 单点金刚石刀具几何参数

1.2.3.1 刀具几何参数对加工表面质量的影响

刀具几何参数对加工表面质量的影响有以下几个方面。

(1) 前角。刀具前角的作用是减少切屑的变形，从而减小切屑在前刀面上的摩擦。切屑的变形和与前刀面的摩擦都会影响到加工表面的质量。试验表明，前角在 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。范围变化时对表面质量影响不大。为了便于装夹，单点金刚石刀具的前角通常选为 0° 。

(2) 后角。刀具后角的作用是减小刀具与工件之间的摩擦，增大后角能减小刃口的挤压和与后刀面的摩擦，理论上会使变形及粗糙度减小。但由于挤压、熨平等现象的影响，后角选用 2° 左右为宜，以减小加工的表面粗糙度。

(3) 主偏角和副偏角。主偏角的减小会增大径向力，从而增大工件和刀具之间的振动，使得表面粗糙度增大。然而，增大主偏角又会增加残留高度，尽管影响不大明显。考虑到金刚石的脆性，主偏角太大会削弱刀尖强度，所以主偏角不能太大。对于副偏角，过小会增加刀具与工件之间的摩擦和径向力，从而增大表面粗糙度；过大会使残留面积和高度增加，从而引起表面粗糙度的增加。所以，应当合理选用刀具的主偏角和副偏角。

(4) 过渡刃。单点金刚石刀具通常不采用主切削刃和副切削刃相交为一点的尖锐刀尖，因为这样的刀尖很容易崩裂和磨损，而采用主切削刃和副切削刃之间的过渡直线来联结，可以增强刀尖，减小表面粗糙度。

(5) 刀尖圆弧半径。理论上，刀尖圆弧半径增大会使残留高度降低，但在实际切削过程中，当切削深度一定时，刀尖圆弧半径越大，其实际主偏角均值越小，径向切削分力增大，容易导致刀具与工件之间的振动，从而产生影响表面粗糙度

的不利因素。同时，由于圆弧切削部分的切屑流出方向不一致，变形复杂而加剧了变形程度，也会增大表面粗糙度，如图 1-14 所示。所以，需要合理选取刀尖圆弧半径值，在特定情况下，可以通过试验来获得最佳值。

1.2.3.2 切削用量参数对加工表面质量的影响

笔者通过一系列切削试验来研究切削用量参数对加工表面质量的影响，工件为铝合金和铜合金，加工设备为两轴超精密数控机床（Nanoform 300）。

(1) 切削速度。对于单点金刚石切削，主轴的转速是超精密切削的重要参数之一。图 1-15 表示了主轴转速对加工表面质量的影响，进给率 $f=15\text{mm/min}$ ，刀尖圆弧半径 $r=1.55\text{mm}$ ，切削深度 $d=2\mu\text{m}$ ，材料为铝合金和铜合金。

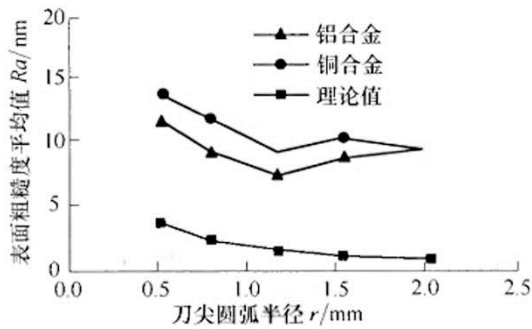


图 1-14 刀尖圆弧半径对加工表面质量（表面粗糙度）的影响

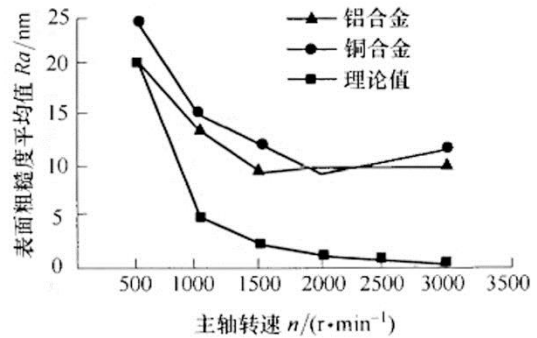


图 1-15 主轴转速对加工表面质量（表面粗糙度）的影响

由图 1-15 可知，理论上，切削速度越快，加工表面粗糙度越小。但在实际加工中，随着主轴转速的增大，工件与刀具之间的相对振动也增大，影响加工表面质量的不利因素也增多了。所以，当转速增大到一定程度后，表面粗糙度减小很慢，甚至有增大的趋势。在实际加工过程中，需要选择一个适当的主轴转速。

(2) 进给率 f 。进给率对表面粗糙度的影响如图 1-16 所示，主轴转速 $n=2000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，刀尖圆弧半径 $r=1.55\text{mm}$ ，切削深度 $d=2\mu\text{m}$ 。

从图 1-16 可以看出，表面粗糙度随着进给率的增大而增大。一般情况下，进给率越小，表面粗糙度越小。但在超精密切削中，进给过小的话，机床容易产

生低速爬行等现象，反而使表面粗糙度增大。所以，在实际加工中，应选择一个最佳进给率。

3) 切削深度。理论上，切削深度对表面粗糙度没有影响。如图 1-17 所示，选用切削参量 $f = 15 \text{ mm/min}$ ， $n = 2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ，可知表面粗糙度与切削深度没有多大关系，这与传统加工中切削深度大而表面粗糙度随之增大有所不同，在超精密切削中，与切削深度的影响相比，材料缺陷、杂质、膨胀以及塑性变形的影响更大。

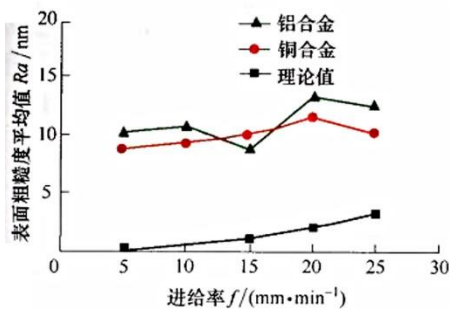


图 1-16 进给率对加工表面质量（表面粗糙度）的影响

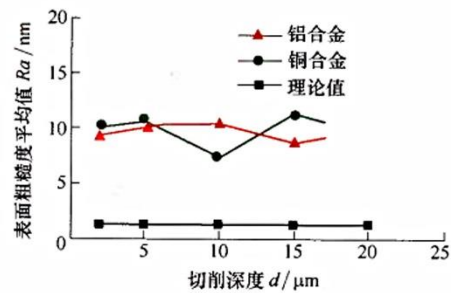


图 1-17 切削深度对加工表面质量（表面粗糙度）的影响

2 超精密测量技术

加工精度的测量和评估包括面形（形状）精度、表面光滑（粗糙）程度两个方面，二者有着密切联系。在超精密加工技术迅速发展的当今时代，超精密光学表面是指具有微米或亚微米量级面形精度和纳米量级表面粗糙度的表面。

光学零件的超精密测量是超精密加工中的重要组成部分，超精密加工的精度通过测量来验证，并获得补偿与修正数据。超精密加工技术的不断发展，要求测量精度的等级不断提高，所以超精密测量技术和仪器的研究及其应用是十分重要的。

2.1 精密加工对测量技术的要求

精密测量是精密加工中的重要组成部分，精密加工的精度和表面质量要依靠测量精度来保证。精密加工机床设备和零件的精度和表面质量的检测要求有：

- 1) 尺寸精度，精加工现在可达到微米级和纳米级精度。

2) 几何精度, 含直线度、平面度、垂直度、圆度、回转误差、角精度、自由曲面的形状误差等。

3) 表面粗糙度, 含表面波度等中频加工误差。

4) 表面变质层, 含金相组织的变化、表面层残留应力等。

测量精度一般应比被测件的精度高一数量级。由于技术发展, 现在加工精度不断提高, 这就需要新的测量方法和更高精度的测量仪器。精密测量的基础技术和常用测量仪器过去已经学过, 本章仅讲述和精密加工有关的并有特点的测量技术。

2.2 超精密测量技术的新发展

超精密测量技术的发展主要体现在下面几个方面。

(1) 高精度测量仪器和测量方法的发展

纳米级线位移常用测量仪器有: ①光栅线位移传感器, 分辨率为 1 nm, 测量范围为 500 mm; ②激光干涉仪, 分辨率为 0.1~10 nm, 测量范围大于 1m; ③原子力显微镜 (AFM) 和扫描探针显微镜 (SPM), 分辨率为亚纳米量级, 测量范围为几十微米; ④扫描电子显微镜 (SEM), 分辨率为 1 nm, 测量范围水平方向为几个毫米。

(2) 超精密在线自动测量技术的发展

在超精密加工机床上配备三坐标测量机及其超精密数控系统, 使加工与测量同步进行, 效率高, 无二次装夹误差, 可以自动完成复杂零件的全部测量。在大批量生产中采用多种专用的自动测量仪器, 不仅提高了测量效率, 而且保证了测量精度。

(3) 测量数据的自动采集处理技术的发展

微电子技术、计算机技术等广泛应用于超精密测量中, 测量结果普遍采用数字显示和存储。很多测量仪器已配备数据处理软件, 使一些复杂的测量结果在数据处理后可以直观地显示并打印输出。

在现有技术条件下, 对具有非回转与非对称特征的空间自由曲面的精确测量与评定具有较大难度, 因为与标准元素构成的曲面比较, 非回转与非对称空间曲

面的参数化表达相对困难，测量和评定较为复杂。常用的面形测量仪器是三坐标测量机和其他接触式测量仪，如英国 Taylor Hobson 公司生产的 Form Talysulf 测量系统。而基于计算机视觉的光学测量仪器采用的是光学非接触式测量原理，在测量速度和测量效率方面与接触式测量相比有了很大改善和提高，像英国的 3DScanners 公司和中国台湾地区的智泰科技公司推出的产品。然而，激光器工作的单向性决定了该方法只能沿一个方向去测量物体，也就是说只有激光能照射到的位置才能测量到，无法测量到物体的侧面或较为陡峭的部分。随着科技的飞速发展，现代超精密制造技术正朝向纳米量级乃至原子量级精度发展，成为激光、通信、计算机、航天航空、材料及生物遗传工程等一系列尖端科学赖以存在和发展的基础。人们对具有自由曲面零件的品质要求越来越高，包括产品性能、制造精度、外形外貌等各个方面，这就使得自由曲面的高精度测量日益成为当前技术发展急需解决的问题，尤其是对用于光电，以及通信产品的各种光学自由曲面，如光纤连接器中的 V 形槽、液晶显示屏的微透镜阵列及激光扫描仪中的 $f-\theta$ 透镜的镜片等，必须采用多轴非对称的超精密加工技术生成，其面形的测量和表面质量的评估对于保障产品性能尤为重要。但由于形状的任意性和几何形态的复杂性，迄今为止仍没有统一成形的测量技术和相关的表面质量评估的国际标准。

2.3 零部件面形精度的评价指标

面型精度的定义：

面型精度是采用精密抛光表面与理想平面的偏差量来表征的数据。

面型精度采用精密抛光表面与理想平面的偏差量来表征。因为使用可以测量波面的干涉仪来测量，所以也称为反射面精度。面型精度的干涉条纹数的单位是 $[\lambda]$ 。 λ 是干涉仪所用的氦氖激光器的波长 632.8nm。

表征面型精度有两个参数：PV 和 RMS 值。

峰谷值 PV

PV 值是 Peak to Valley（峰值与谷值的差值）。是被检波面上点与点误差的最大值，如图 1 所示。他的计算只用到了被检波面相对于参考波面的最高点与最低点。波面峰谷值可以用公式表示为：

$$PV = \max(\Delta W) - \min(\Delta W) \quad (2-1)$$

式中， ΔW 表示波差，即被检表面相对于参考表面的偏离值。

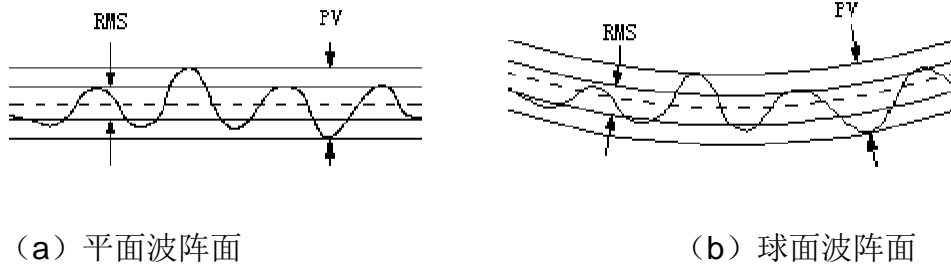


图 2-1 波面偏差的表示方法

1879 年瑞利 (Rayleigh) 在观察和研究光谱仪成像质量时提出: “实际波面和参考波面之间的最大波像差不超过 $\lambda/4$ 时, 此波面可看作是无缺陷的”, 称为瑞利判断。这个判断提出了两个标准: 首先, 在瑞利看来, 有特征意义的是波像差的最大值, 而参考球面的选择的标准是使波像差的最大值为最小。其次是提出在这种情况下波像差的最大值的容许量不超过 $\lambda/4$ 时, 则认为像质量是好的。瑞利判断就是以波像差的最大值即 PV 值作为评价标准的, 对于小像差系统, 例如望远镜和显微镜物镜, 只要最大波像差不大于 $\lambda/4$, 就可认为像质是优良的。精密光学系统的波像差应不大于 $\lambda/10$ 。

瑞利判断作为小像差系统的像质评价标准, 它着眼于整个系统 (由一个或多个光学元件组成), 即整个系统最后的波像差要满足瑞利判断。对光学加工者来说, 他们考虑的是单个光学元件的面形质量, 用波面 PV 值作为评价标准是简单方便的, 在一定程度上能反映出面形质量, 如抛光后满足瑞利判断的面形可以认为是一个较好的面形。

均方根值 RMS

RMS 值是 Root Mean Square (均方根值), 是被检波面相对于参考波面的均方根偏离, 如图 2-1 所示, 它和峰谷值一样是评价面形的主要指标。设通光孔为圆孔, 则波面均方根值用公式表示为:

$$RMS = \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [\Delta W(\rho, \theta) - \overline{\Delta W}]^2 \rho d\rho d\theta \right)^{1/2} = \left(\overline{\Delta W^2} - (\overline{\Delta W})^2 \right)^{1/2} \quad (2-2)$$

式中, $\overline{\Delta W^2}$ 、 $\overline{\Delta W}$ 分别为波差的平方平均值和平均值。

$$\overline{\Delta W^2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Delta W^2(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (2-3)$$

$$\overline{\Delta W} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Delta W(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \quad (2-4)$$

选择适当的参考面可以使 $\overline{\Delta W}$ 为零, 这样的参考面即最佳参考面。因为均方根值的计算用到了干涉图的每个数据点, 它把每个点对面形误差的贡献都考虑在内, 因而它比 PV 值更能精确的反映被检表面的面形精度, 用它作为评价标准也更有意义。根据经验 RMS 值是 PV 值的 1/3 左右。

2.4 纳米级精度和表面粗糙度的测量技术

纳米级测量技术包括尺寸和位移的纳米级精度测量，表面形貌和粗糙度的纳米级测量。这时常规的量仪已不易达到要求的测量分辨力和测量精度，现在纳米级测量技术主要的应用和发展方向如下：

2.4.1 接触式激光干涉形貌测量法

接触式激光干涉形貌测量法的原理如图 2-2 所示，从激光器发出的光线通过分光片，一部分光经一个固定的参考镜面反射，另一部分由固定在触针臂上的测量镜面反射。两束反射光生成干涉条纹的相位与固定在触针臂，上的镜面的位移成正比，因此可通过触针在被测工件表面垂直移动，或在被测表面水平移动，来直接获得被测表面某一截面的轮廓曲线或三维形貌。经计算机内部配备的各种分析软件进行数据处理，可得到接近真实轮廓的各种表面特征参数或输出图形。

接触式激光干涉测量系统是由 Taylor Hobson 公司制造的产品，其外观如图 2-3 所示。通过金刚石触针相对于工件表面的运动，可用于平面、球面、非球面及自由曲面的二维与三维表面测量和分析，z 向测量精度高达 0.8 nm。测量特性由包括在 x, y 方向上的测量长度、宽度、采样长度及测量区域探头的自动定位等因素决定，并可灵活地互换工件台和传感器支撑架的位置。

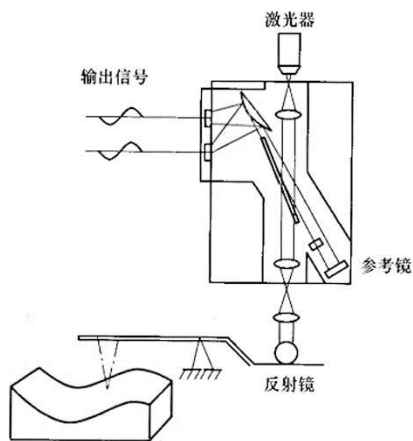


图 2-2 接触式激光干涉形貌测量原理 图 2-3 接触式激光干涉形貌测量系统测量设备（TAYLOR HOBSON PGI OPTICS）

通过自身配备的分析软件，接触式激光干涉形貌测量系统可实现二维轮廓的形状和表面粗糙度分析、非球面的三维表面分析、滤波和表面参数评定以及自由曲面的数据采集，主要功能包括较大的量程和较高的分辨率（x, y, z 轴）：量程

为 200 mm×100 mm×450 mm；z 轴分辨率高达 0.8 nm；可提供三维高精度测量功能（系统噪声低于 1 nm）；使用崭新的非球面分析软件。该类仪器具有较高的分辨率及较大的量程，如 FormTalysurfPGI1240 的分辨率可达 0.8 nm，测量范围可达 200 mm，同时具有测量可靠、操作方便、价格便宜以及符合表面粗糙度国际标准评定的要求等优点。但是此类仪器有两个主要缺点：①对于接触式测量，触针与工件表面存在一定的测量力，且随着量程的增大而增大，锋利的金刚石触针在一定测量压力下会损伤工件表面，并影响测量结果的真实性和准确性。同时在测量过程中还可能会损坏触针，因此对于一些软金属、生化材料、橡胶表面以及含信息和超精密加工工件的表面，一般不宜用这种方式进行测量。②受测头半径、形状、测量力以及测头动态性能的影响，触针式测量速度慢，一般约为 1 mm/s，特别是在三维形貌测量过程中需耗过多时间，从而导致温度漂移，带来测量误差。

2.4.2 非接触式激光干涉形貌测量法

非接触式激光干涉形貌测量方法以其速度快、无磨损、无需进行测头补偿且特别适合于易碎易变形的材料等优点而倍受关注，测量原理如图 2-4 所示。非接触测量仪器不会划伤工件表面，可用于测量软质材料、镀膜表面、光学表面触针式不能真实反映的精细结构表面，但对被测表面的清洁度要求较高，对于反射性较差或有较大倾斜角的表面会造成失真。

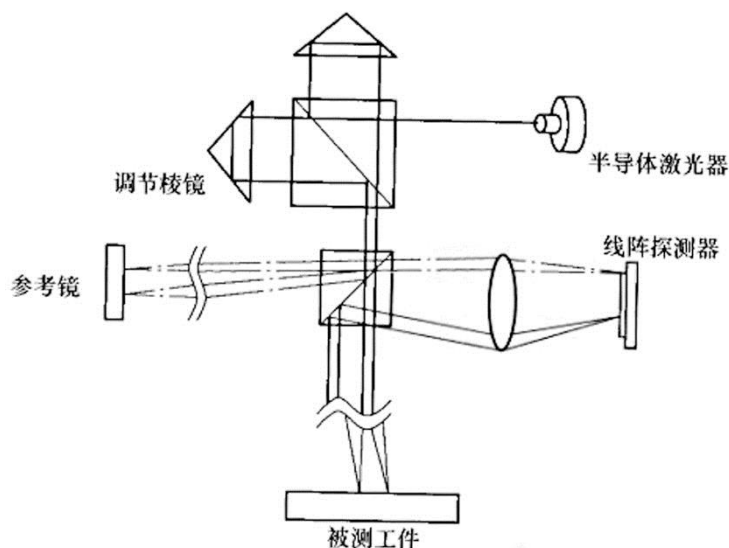


图 2-4 非接触式激光干涉形貌测量原理

Wyko NT800 光学轮廓仪是美国 Veeco 精密仪器有限公司推出的功能强大的

光学轮廓仪，其外观如图 2-5 所示。显微单元放置在由空气隔绝的防振平台上，以抑制各种振动因素，操作环境下的振动问题可以得到最大程度的减少。该仪器具有快速自动聚焦、自动转台、有计算机控制台、提供纳米量级精度、快速输入与输出能力、防止干扰等特点，可快速测量台阶高度、表面粗糙度和表面形貌，可对 0.1 nm 到 8 mm 的尺寸进行非接触式三维测量，具有纳米量级分辨率。为了扩大测量范围，仪器提供两种测量方式，其中 VSI 模式适于粗糙表面，量程为 500 μ m；而 PSI 模式适于光滑表面，量程为 160 nm，垂直测量高度可达 0.1mm~8mm。横向分辨率由所选放大物体和测头排列大小决定，垂直分辨率按照 Rq 决定。它有一个独特的内部参考信号，对整个扫描范围进行精度自校准。100 μ m/s 的扫描速度和全自动化的组合，使得 WykoNT8000 在需要超精密测量的场合能发挥出最佳的性能。

由美国 Zygo 公司制造的 Zygo Verifire™ HD 型激光干涉测量系统属非接触式测量仪，其外观如图 2-6 所示，主要用于测量超精密加工工件的形状及曲率，可对平面及球面的表面形状精度进行无损检测。采用此设备可同时测出光学透镜的中心偏差和刀具对中偏差。

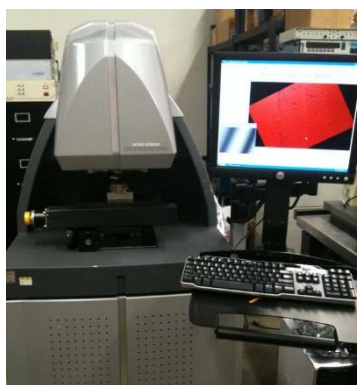


图 2-5 Wyko NT8000 光学轮廓仪

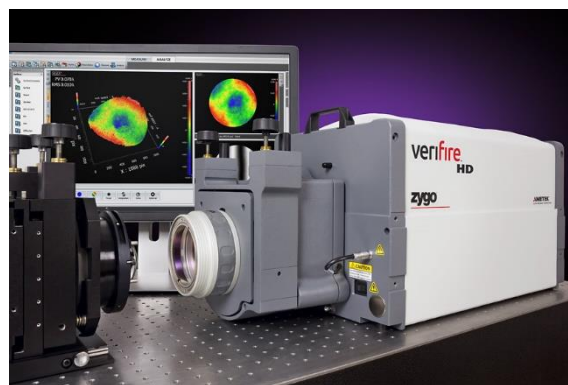


图 2-6 Zygo Verifire™ HD 测量系统

2.4.3 超高精度原子力测量三维轮廓仪法

超高精度三维轮廓测量仪 16UA3P 利用原子力探针 (AFP) 作为测量探测器，在测量过程中，探针在扫描趋近被测表面的触及区域时会产生一个原子力（排斥力或吸引力）。保持原子力探针针尖与被测表面之间的作用力恒定，即可维持探针与表面之间极其微小的距离不变。根据针尖扫描被测表面各点针尖的 z 方向

的移动量与该点的 x , y 方向的位置参数, 即可得到被测面的形貌图像。

由于利用原子斥力作用时, 探针针尖与被测表面的距离约为十分之几个纳米, 而利用原子引力作用时约为几个纳米至几十个纳米, 因此原子力测量属于非接触式、非破坏性测量。

UA3P 可测量与水平面倾斜成 60° 角的曲面体, 而且与被测表面的反射率大小无关。该轮廓仪对 x , y , z 轴三个方向的微小位移量采用波长 633nm 碘稳频 He-Ne 激光干涉仪进行测量。由于波长 633nm 碘稳频 He-Ne 激光的频率稳定度高达 $10^{-11}\sim 10^{-12}$, 频率复现性为 $(1\sim 2) \times 10^{-11}$, 频率/波长的不确定度为 2.5×10^{-11} , 因此其 x , y , z 三维微小位移量的测量精度及其稳定性非常好。同时, 由于该轮廓仪采用超高精度的标准(参考)平面镜, 因而排除了因直线度误差而引起的测量误差, 实现了最准确的三维测量。

UA3P 测量系统的测量原理示意图如图 2-7 所示, 其技术性能指标见表 2-1。新的型号 UA3P-300 能够测量的最大角度可以达到 75° , 精度可达 $0.15\mu\text{m}$ 。

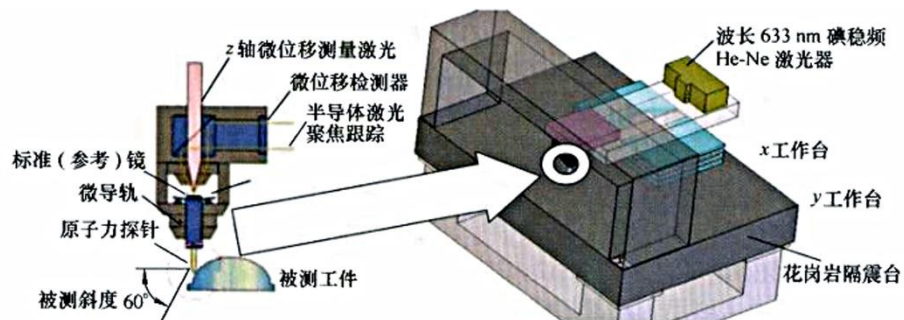


图 2-7 UA3P 测量系统原理示意图

表 2-1 Panasonic UA3P 测量系统的性能指标

名称	UA3P-4	UA3P-5	UA3P-6
型号	PED-16109304	PED-16109305	PED-16109306
量程 (x , y , z 轴)	100 mm×100mm×35mm	200 mm×200mm×45mm	400 mm×400mm×90mm
探针		尖端半径	测量力

	红宝石	0.5 mm	0.3 mN
	钻石	2 μm	0.3 mN
最大测量角度	60°		
探针测量精度	红宝石、新钻石		
	测量面的倾斜角度	精度	
	$\leq 30^\circ$	0.01~0.05 μm	
	$\leq 45^\circ$	$\leq 0.1 \mu\text{m}$	
	$\leq 60^\circ$	$\leq 0.3 \mu\text{m}$ (圆周扫面为 $\leq 0.1 \mu\text{m}$)	
	标准钻石		
	测量面的倾斜角度	精度	
$\leq 30^\circ$	$\leq 0.1 \mu\text{m}$		
z 轴分辨率	3 nm		
测量误差	测量范围 ≤ 100 mm 时, $\leq 0.05 \mu\text{m}$ (再现性 $\leq 0.05 \mu\text{m}$)		
	测量范围 ≤ 200 mm 时, $\leq 0.10 \mu\text{m}$ (再现性 $\leq 0.05 \mu\text{m}$)		
	测量范围 ≤ 400 mm 时, $\leq 0.20 \mu\text{m}$ (再现性 $\leq 0.05 \mu\text{m}$)		
测量速度	0.01~10 mm/s	0.02~20 mm/s	

2.4.4 超精密 3D 坐标测量机

制造和研究的不同领域, 日益需要用超精密 3D 仪器来测量大尺寸工件。荷兰 IBS 精密工程 (Precision Engineering) 公司开发了一种新型超精密坐标测量机 (CMM) Isara4007, 用它可获得较大的测量体积和测量准确度比。它是一个多触针 3D 坐标测量机, 可实现对大型复杂结构零件的纳米级尺度测量。它可测量复杂曲面, 如非球面、自由曲面或者集成光学面, 测量精度可以达到纳米级, 克

服了现有光学测试方法或接触式轮廓仪测量的局限性。它采用基于极小力全 3D 触觉技术的高精度测量系统 Triskelion，被测曲面在测量过程中不会受到损坏，测量时不像其他光学测量系统那样非常依赖工件表面的反射性和连续性。另外，它采用 Triskelion 触针实现全 3D 的测量，测量精度也不受限于表面角度精度以及 x、y 方向上的横向位移精度。

Triskelion 超精密触针设计如图 2-8 所示，具有 3 个超精密电容传感器，集成为一个触头体。传感器用以确定 3 个目标盘的位移量，连接于板簧片形成探针的悬架。Isara 利用 3 个平面反射镜干涉仪，测量结果直接可追溯到国际标准。

阿贝准则规定，为了避免判读误差，测量系统必须与被测量同轴放置。在 Isara400 超精密 3D 坐标测量机中，使用阿贝准则充分实现了整个测量范围的所有 3 个坐标轴。该测量系统有一个活动产品平台——一个 x 和 y 方向的浮动平台。测量框架在 z 向移动；反射平台相对于测量框架的位置用 3 个平面反射干涉仪检测，并对由于空气温度、压力以及相对湿度造成的变化进行补偿；3 束激光与触针顶端中心始终保持成一线性。Isara400 超精密 3D 坐标测量机使用阿贝准则如图 2-8 所示。

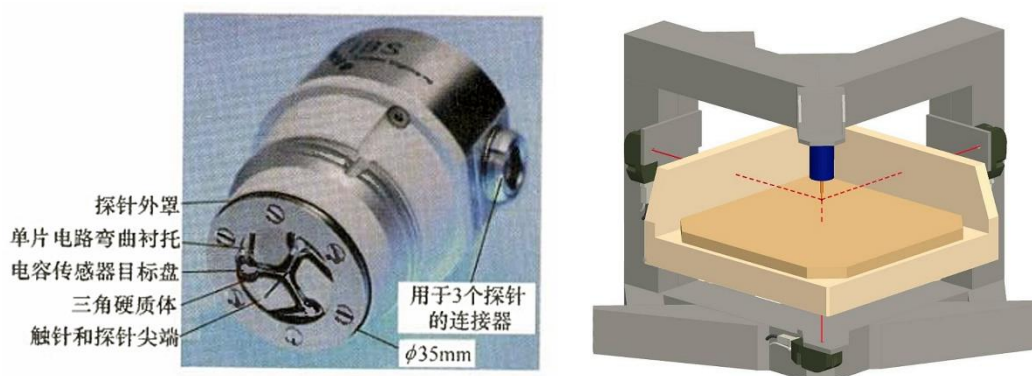


图 2-8 Triskelion 超精密触针设计 图 2-9 Isara400 超精密 3D 坐标测量机使用阿贝准则示意图

测量设备对其计量学构架和结构功能的要求是完全不同的。Isara400 能够达到纳米尺度范围的测量，是通过应用不同的构架来完成的。计量学构架优化测量系统的位置稳定性，基体构架处理激励器力度。基体构架的变形对测量没有影响，因为两套构架是零压力耦合的。Isara 400 的特征浮动平台的设计，使得其对工件的承载能力达到 32kg。对于此设计，触针将在竖直方向，上移动，计量构架仍然

为一体，3个激光干涉仪都与触针保持阿贝准则。

因 Isara400 利用模拟测量触头来测量其本身顶端的偏离，从而可进行自动扫描测量。当触头沿着工件表面进行 1 描测量时，触针始终保持与工件表面接触，实现具有高测量数据密度的表面轮廓线测量（依赖于扫描速度和采样频率，测量点间距通常小于 1 μm ）。工件形状不需要预先知道，扫描测量软件利用测量触针的偏离来控制机器的移动量，同时触针顶端与工件的接触力保持恒定在约 0.1mN。表 2-2 概括了 Isara400 超精密坐标测量机的规格参数。

表 2-2 Isara400 超精密坐标测量机的规格参数

主要尺寸		机器质量	
Isara	3D CMM :		
2596mm×2279mm×2356mm		悬挂机器质量：≈3000kg	
控制室：800mm×800mm×2100mm		包括下支架和外罩总质量：≈4000kg	
控制室到机器距离：≈2m			
xyz 三轴规格			
x 轴测量范围：400 mm		轴可选移动速度：0.01~10 mm/s	
y 轴测量范围：400 mm		可选择探测速度：0.01~1 mm/s	
z 轴测量范围：100 mm		定位精度：禁止状态，优于±0.5 μm (x, y, z)	
		过冲：≤10 μm (最大探测速度)	
测量系统			
激光干涉系统分辨率：x, y, z 轴为 1.6 nm			
1D 测量不确定性（如沿台阶形量规（step gage）的某一面进行单一轴向测量）			
	x 轴	y 轴	Z 轴

全行程	400 mm	400 mm	100 mm
不确定性	52 nm	49 nm	57 nm
2D 测量不确定性（如沿 2 个机器轴的轮廓线测量）			
不确定性	xz 轴	yz 轴	Xy 轴
	72 nm	70 nm	71 nm
3D 测量不确定性（完全 3D 测量，如自由曲面光学面）			
不确定性		109 nm	

2.5 精密测量的环境条件

要获得精确可靠的测量结果，除了要有精密的测量仪器和正确的测量方法外，还必须有稳定和合适的测量环境条件。

2.5.1 恒温条件

由于各种工程材料都有热膨胀，恒温是精密测量的必要条件。标准测量温度是 20C，计量室可根据测量精度确定允许的温度波动。但加工车间很难控制到要求的恒温温度。当加工车间内不是标准温度（20C），并且往往被测零件温度高于室温时，测出的零件尺寸需要考虑零件实际温变变化造成的测量尺寸误差，在测量结果中给予修正。表 2-3 是几种常用的工程材料的线膨胀系数，可根据零件材料和实际温度计算出尺寸变化。

表 2-3 几种工程材料的线膨胀系数

材料	线膨胀系数/ $[\mu\text{m}/(100\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})]$	材 料	线膨胀系数/ $[\mu\text{m}/(100\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})]$
铝	2.214	铸 铁	1.08
青铜	1.782	TiC	0.594

钢	1.116	钢 钢	0.27
---	-------	--------	------

2.5.2 隔振条件

进行精密测量时要避免振动引起的测量误差。应尽可能采取各种减振隔振措施。如在加工车间内机床上测量，应停止机床转动，并将零件从夹紧状态松开，去除夹紧变形和机床振动，再进行测量。

2.5.3 气压、自重、运动加速度等环境条件

当测量达到极高精度时，一些平时不考虑的问题也会影响测量精度。例如 1m 长的钢棒在真空中的长度较在大气中大 $0.3\mu\text{m}$ ，故如气压有明显变化，将造成测量误差。100mm 长的钢棒垂直放置时，由于自重而使材料产生压缩变形，长度约缩短 $0.002\mu\text{m}$ 。故在高空或海底测量的长度值将有误差。运动物件有加速度时，因受力而使尺寸测量有误差。

2.5.4 其他环境条件

湿度的变化对超精密测量也存在一定的影响。较大的湿度会影响带有气浮轴承圆度仪的正常长期使用，造成轴系材料的锈蚀，从而影响测量精度；磁场与电场波动会影响纳米测量仪器的测量精度，产生不可忽视的测量噪声；空气扰动会对激光干涉仪器测量长度产生一定不良影响。

2.5.5 气压、自重、运动加速度等环境条件

当测量达到极高精度时，一些平时不考虑的问题也会影响测量精度。例如 1m 长的钢棒在真空中的长度较在大气中大 $0.3\mu\text{m}$ ，故如气压有明显变化，将造成测量误差。100mm 长的钢棒垂直放置时，由于自重而使材料产生压缩变形，长度约缩短 $0.002\mu\text{m}$ 。故在高空或海底测量的长度值将有误差。运动物件有加速度时，因受力而使尺寸测量有误差。

2.5.6 其他环境条件

湿度的变化对超精密测量也存在一定的影响。较大的湿度会影响带有气浮轴承圆度仪的正常长期使用，造成轴系材料的锈蚀，从而影响测量精度；磁场与电场波动会影响纳米测量仪器的测量精度，产生不可忽视的测量噪声；空气扰动会

对激光干涉仪器测量长度产生一定不良影响。

3 超精密加工在线测量及补偿

3.1 保证零件加工精度的途径

保证零件加工精度的途径有两条：一条是靠所用的机床来保证，即机床的精度要高于工件所要求的精度，这是所谓的“蜕化”原则，也称为“母性”原则。例如要加工精密齿轮就需要有高精度的齿轮加工机床，如高精度滚齿机、高精度插齿机和磨齿机等。不少制造厂为了保证所生产产品的质量，想方设法购买或自行研制精密机床。但制造精密机床和超精密机床在技术上难度很大，耗资也很大，随着精度的不断提高，技术难度和耗资也越来越大，甚至达到不可能的程度。这就使人们提出另一条思路，即在精度比工件要求较低的机床上，利用误差补偿技术，提高加工精度，使加工精度比机床原有精度高，这是“进化”原则，也称为“创造性”原则。因此近年来，误差补偿技术受到重视，发展很快。

从提高加工精度的角度来看，也有两条途径：一条是误差的隔离和消除，即找出加工中误差产生的根源，采取相应措施，使误差不产生和少产生，如加工理论误差可采取建立正确的运动关系和数学模型来消除，其中典型的例子是在超精密车床的传动系统中，采用齿轮传动会造成传动不稳性，影响加工精度，因此多采用带传动。又如加工时，机床精度不够高，可采用精度更高的机床，从而减小了机床精度的影响。另一条途径是误差的补偿，它立足于用相应的措施去“钝化”、抵消、均化误差，使误差减小，是一种“后天”措施，不是“先天”措施。随着加工精度的提高，要提高加工精度的难度就越来越大，采用误差补偿技术的意义也越来越重要，因此，在精密加工和超精密加工中，误差补偿技术已成为重要的手段之一。

3.2 加工精度的检测

要进行误差补偿，首先要进行精度检测，精度检测的环境（即场地）与误差补偿的关系比较密切，从精度检测所处的环境来看，精度检测可分为：离线检测、在位检测和在线检测。

3.2.1 离线检测

工件加工完毕后，从机床上取下，在机床旁或在检测室中进行检测，这就是

离线检测。

一般情况下，加工后的检测，如不加以说明，都是指的离线检测。离线检测只能检测加工后的结果，不一定能反映加工时的实际情况，也不能连续检测加工过程中的变化，但检测条件较好，不受加工条件的限制，可充分利用各种测量仪器，因此，测量的精度比较高。

目前，精密加工和超精密加工的精度越来越高，表面粗糙度值越来越小，已进入纳米级阶段，因此对检测的要求越来越高。对小尺寸的测量，电容式传感器测头的分辨力可达 0.1 nm （量程 $5\mu\text{m}$ ）、频响 $> 10\text{kHz}$ 、线性误差小于 0.1% ；光电子纤维光学传感器测头的分辨力可达 0.5 nm （量程 $30\mu\text{m}$ ）、线性误差为 5% ；扫描隧道显微镜（STM）的分辨力可达 0.01 nm （量程 20 nm ）。对于大尺寸的测量，外差式激光干涉仪的分辨力可达 1.25 nm （量程 $\pm 2.6\text{ m}$ ）；高精度氦氛激光干涉仪的分辨力可达 0.1 nm （量程 2 m ）；光栅尺的分辨力可达 10nm （量程 1 m ）。对表面粗糙度的测量已不能满足于接触式测量，出现了光学纤维传感器等非接触式测量仪器。检测情况与误差补偿的关系十分密切，若检测精度高，且稳定可靠，则误差补偿的效果越好。

3.2.2 在位检测

工件加工完毕后，在机床上不卸下工件的情况下进行检测，称为在位检测。这时所用的检测仪器可事先装好在机床上备用，也可临时进行安装使用。

在位检测也只能检测加工后的结果，不一定能反映加工时的实际情况，同时也不能连续检测加工过程的变化，但可免除离线检测时由于定位基准所带来的误差，如加工时所用的定位基准与检测时所用的定位基准不重合，工件上定位基准的制造误差所造成的定位基准位移等。因此，与离线检测相比，其检测结果更接近实际加工情况。另外，如果检测后发现工件某些尺寸不合格，还可以进行返修（当然应有足够余量），而在离线检测情况下，很可能因为再次装夹所造成的误差而使得余量不够。所以在精密加工和超精密加工时，在位检测的应用比较广泛，但要仔细考虑检测仪器的选用、安装和检测方法，如果要借用机床本身的运动，则要考虑机床的运动精度，并在数据处理时能分离它们所造成的检测误差。由于在精密加工和超精密加工中所用机床的精度比较高，在位检测不失为一种好方法。

3.2.3 在线检测

工件在加工的同时进行检测，称为在线检测，也有的称为主动检测、动态检测。

1) 能够连续检测加工过程中的变化，了解在加工过程中的误差分布和发展，从而为实时误差补偿、预报误差补偿和控制创造了条件。

2) 检测结果能反映实际加工情况，如工件在加工过程中的热变形情况就可以通过在线检测来得到，而离线检测只能测量工件在冷态下的精度。

3) 在线检测由于是在加工过程中进行的，会受到加工过程中的一些条件限制，如检测传感器的安置，切削液和切屑的状况，传感器的性能（灵敏度、频响、稳定性、抗干扰能力等）及尺寸等都会影响在线检测的可行性和测量结果的正确性。因此，在线检测的难度一般较大。

4) 在线检测大都用非接触传感器，对传感器的性能要求较高，如测量工件圆度的电容传感器、测量工件直线度和机床导轨直线度的激光干涉仪、测量机床温度场分布和变化的红外传感器及热象仪等。非接触测量不会破坏已加工表面，这对精密和超精密加工是十分重要的，对离线检测、在位检测也是如此。但在在线检测时，由于检测时间长，接触式检测会造成测头磨损、接触状态不稳定等问题。

5) 在线检测一般是自动运行，形成在线检测系统，包括误差信号的采集、处理和输出，与误差补偿控制系统的连接。因此它往往不是一种单纯的检测方法。

从检测对象来分，在线检测有两种类型：

1) 直接检测系统。该系统直接检测工件的加工误差，并补偿之，是一种综合检验的方式，检测装置的安装位置、加工中的切削液、切屑和振动的影响等，都是比较难以处理的问题。误差信号的采集和处理也比较复杂，但其优点是直接反映了加工误差。

2) 间接检测系统。该系统检测产生加工误差的误差源，并进行补偿，如对机床主轴的回转运动误差进行检测和补偿，以提高工件的圆度；又如对螺纹磨床的母丝杠的热变形进行检测和补偿，以提高被加工螺纹的螺距精度。这种在线检测系统相对来说简单些，因为它与加工状况和环境的关系不大。

3.2.4 误差补偿技术

3.2.4.1 误差补偿概念

在机械加工中出现的误差采用修正、抵消、均化、“钝化”等措施使误差减小或消除，就是误差补偿的概念。在装配过程中，也可利用误差补偿来提高装配精度。

在丝杠车床上为了提高螺距精度，常采用机械修正装置，它是通过杠杆将修正尺和母丝杠的螺母联接起来。修正尺上的修正曲线使母丝杠的螺母做附加微小转动，从而使刀架产生附加微小位移来补偿母丝杠的螺距误差，如图 3-1 所示，这是修正法，或称校正法。

为了提高丝杠车床主轴的回转精度，在装配时人为地选择前后轴承的偏心量和偏心方向，如果选择前轴承的偏心量小于后轴承的偏心量，且两者的偏心在同方向，则可将偏心误差抵消一部分，从而提高了主轴的回转精度，如图 3-2 所示，这是抵消补偿。

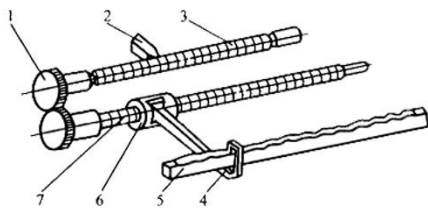


图 3-1 丝杠车床母螺距误差的修正
1-配换齿轮 2-螺纹车刀 3-工件 4-杠
杆 5-修正尺 6-母丝杠螺母 7- 母
杠

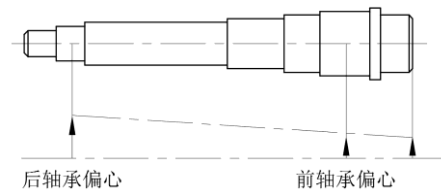


图 3-2 车床主轴径向圆跳动误差的抵
消调整

多齿分度盘俗称鼠牙盘，是用两个齿数较多并相等的三角形端面齿的齿盘来分度的，其关键零件是上、下两个齿盘，采用四点易位对角研磨法进行终加工。研磨时，上齿盘，上下运动与下齿盘产生研磨运动，两盘之间有研磨剂，在这过程中，上齿盘以正转 180° 后反转 90° 的顺序转位，其位置为 $0^\circ-180^\circ-90^\circ-270^\circ-180^\circ-360^\circ-270^\circ-90^\circ-0^\circ$ ，八次为一循环，一次循环后，上齿盘相对下齿盘转动一个齿，再进行下一个循环，直至全部齿转完，如图 3-3 所示。这种研磨方式是使齿

距误差充分均化，可得到很高的分度精度，是一种误差补偿方式。在使用多齿分度盘进行分度时，也由于误差均化而获得很高的分度精度。

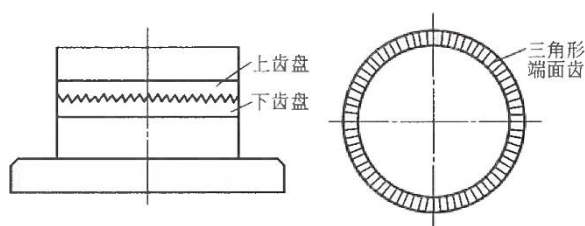


图 3-3 多齿分度盘齿距误差的均化

在进行车削加工时，由于导轨在垂直面上的纵向直线度会造成刀尖中心高位置的变化，从而影响工件的加工精度。如图 3-4a 所示，当刀具安装在水平方向位置，若刀尖位置下降 h 值时，工件在半径上尺寸会增大 ΔR ，其关系为

$$(R + \Delta R)^2 = h^2 + R^2$$

$$h^2 - 2R\Delta R - \Delta R^2 = 0$$

因 ΔR 一般很小，忽略 ΔR^2 项，可得

$$\Delta R = h^2 / (2R)$$

若将刀具安装在垂直方向位置，如图 3-4b 所示，当刀尖位置下降 h 时，工件在半径上的尺寸会减小 h 值。可见刀具安装在水平方向位置时，刀尖位置下降不处于误差敏感方向， ΔR 与 h 是二次方的关系，影响较小。刀具安装在垂直方向位置时，刀尖位置下降正是处于误差敏感方向，影响较大。因此使误差出现在与误差敏感方向相垂直的地方就会减小其影响，这时使误差“钝化”也是一种误差补偿的方式。

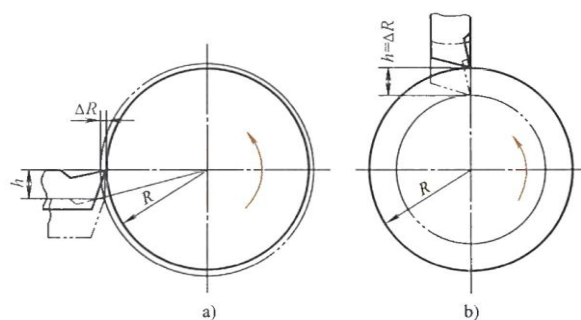


图 3-4 车削时导轨在垂直面上的纵向直线度所造成加工误差的“钝化”

在测量精密轴系径向圆跳动时，常在其主轴上安装一个标准球，通过测量标准球的径向圆跳动作为该轴系的径向圆跳动。实际上，其检测结果包含了标准球的形状误差。对于精密轴系来说是不容忽视的，因此要将这部分误差分离出去，通常是在测量后通过数据处理来进行，这就是误差分离技术，它具有广泛的应用范围，常常是误差补偿系统中的一个组成部分，也被认为是误差补偿的一种形式。

从上述的几种情况可知，误差修正、抵消、均化、“钝化”、分离等都是误差补偿的各种形式或方法，误差修正、误差校正通常是误差补偿的同义词，这是从误差补偿这一术语的广义角度来论述的。但从狭义的角度来分析，误差修正（校正）是指对测量、计算、预测所得的误差进行修正（校正）；误差分离是指从综合测量所得的误差中分离出所需的单项误差；误差抵消是指两个或更多个误差的相互抵消；而误差补偿应该是指对一定尺寸、形状、位置相差程度（差值）的补足，本章所论述的误差补偿主要是指这一种。

3.2.4.2 误差补偿的类型

误差补偿可根据不同的特征来分类。

（1）实时与非实时误差补偿 在加工过程中，实时进行误差检测，并随后紧接着进行误差补偿，就是实时误差补偿，也就是在线检测误差补偿，又称为动态误差补偿。其特点是：

1) 误差补偿精度较高。

2) 不仅可以补偿系统误差，而且可以补偿随机误差。因为在动态过程中误差值变化迅速，补偿在时间上总有滞后，对于随时间变化的变值系统误差（不能用数学模型表达的）和随机误差，不能全部补偿。

3) 实现补偿的技术复杂，实施环境有限制，甚至有些情况不能进行实时误差补偿。4) 实施费用较高。

非实时误差补偿只能补偿系统误差，又称为静态误差补偿。

（2）软件与硬件误差补偿 计算机技术的发展使得误差补偿可采用软件的形式进行；例如在数控机床的随动进给系统中，所采用的滚动丝杠尽管有消除间隙结构，但总会有反向间隙（死区），如果其数值是稳定的，可通过增加脉冲数来进行补偿，以提高伺服（随动）进给系统的精度。在闭环数控系统中，进给运

动的移动量是由检测装置以脉冲计数方式反馈到数控装置的比较器中,与原来的指令脉冲数进行比较,当两者相等时,进给运动停止。这些都是软件补偿的实例,可见它是通过计算机对所建立的数学模型进行运算后,发出运动指令,由数控伺服(随动)系统完成误差补偿动作。前述的丝杠车床母丝杠螺距误差补偿,采用修正尺来修正,是一种硬件补偿。因此,软件补偿与硬件补偿的区分是看补偿信息是由软件产生的还是由硬件产生的。

软件补偿的特点如下:

1) 有较高的动态性能,补偿值可随工作状态的变化而即时变化,即具有柔性。
2) 补偿信息通过计算机对所建立的数学模型进行运算后产生,因此要有计算机控制系统,一般都是数控系统。

3) 补偿系统机械结构简单、经济,工作方便可靠。

(3) 单项与综合误差补偿 综合误差补偿是指同时补偿几项误差,如在精密车床上同时对工件的圆度和圆柱度进行误差补偿。显然,综合误差补偿比单项误差补偿要复杂,但效率高、效果好。

(4) 单维与多维误差补偿 多维误差补偿是在多坐标上进行误差补偿,如在三坐标测量机上同时对三个坐标进行误差补偿,其难度和工作量都比较大,是近几年来发展起来的误差补偿技术。

此外,误差补偿还可以根据误差的类型来分类,如系统误差补偿和随机误差补偿,原始误差补偿和加工误差补偿等。原始误差是指造成加工误差的误差源,如原理误差、装夹误差、工艺系统的精度等。

3.2.4.3 误差补偿过程及其系统组成误差补偿的过程如下:

- 1) 反复检测误差出现的状况,分析其数值和方向,寻找其规律,找出影响误差的主要因素,确定误差项目。
- 2) 进行误差信号的处理,去除干扰信号,分离不需要的误差信号,找出工件加工误差与在补偿点补偿量之间的关系,建立相应的数学模型。
- 3) 选择或设计合适的误差补偿控制系统和执行机构,以便在补偿点实现补偿运动。
- 4) 验证误差补偿的效果,进行必要的调试,保证达到预期要求。

误差补偿系统的一般组成如下：

- 1) 误差信号的检测。它是误差补偿控制的前提和基础，由误差检测系统来完成。误差检测系统应根据误差补偿控制的具体要求来设计，它所检测的项目、采用的检测仪器以及检测精度要求等均与误差补偿的要求有密切关系。误差信号检测的可行性和正确性直接影响误差补偿的成功与否。
- 2) 误差信号的处理。由误差检测系统所测得的误差信号，其中必然包含着某些频率的噪声干扰信号，也会有几种误差信号混合在一起，这就需要进行一些处理，分离不需要的信号，提取所需要的误差信号，并能够满足误差补偿的要求。误差信号处理的关键是要有足够的处理能力和处理速度，一般都采用快速高精度运算方法、高速处理器和性能优良的微型计算机来进行误差信号处理，并能进行在线处理。
- 3) 误差信号的建模。建模就是要找出工件加工误差与在补偿作用点上补偿控制量之间的关系，称为误差模型。由于通常都有数学关系，故可统称数学模型。在精密和超精密加工中，影响加工精度的因素很多，有些因素属于系统误差，其误差信号的处理和建模比较方便；但有些因素属于随机误差，其误差信号的处理和建模比较困难，工作量大。同时，由于误差信号的采集、处理、运算总需要一定的时间，会造成误差补偿控制与误差检测之间的时间滞后。当前，出现了随机过程建模方法，即把加工过程看成是一个随机动态过程，用时间序列分析方法建立其误差模型，它不仅描述了当时加工过程的误差值，而且可以预测未来加工过程的误差值，从而弥补了误差补偿控制与误差检测之间的时间滞后，为在线误差检测与补偿创造了条件。
- 4) 补偿控制。根据所建立的误差模型，并根据实际加工过程，用计算机计算欲补偿的误差值，输出补偿控制量。对于数控系统，补偿控制量就是正负脉冲数。
- 5) 补偿执行机构。它是具体执行补偿动作的，设置在补偿点上。由于补偿是一个高速动态过程，要求位移精度和分辨力高，频响范围宽，结构刚度好，因此补偿执行机构多用微进给机构来完成。微进给机构又称为微位移机

构，有机械、电磁、压电等多种结构，可根据具体要求设计。值得注意的是补偿执行机构应与它配合使用的驱动控制电源作为一个系统来考虑。

图 3-5 是误差补偿系统的组成示意图。

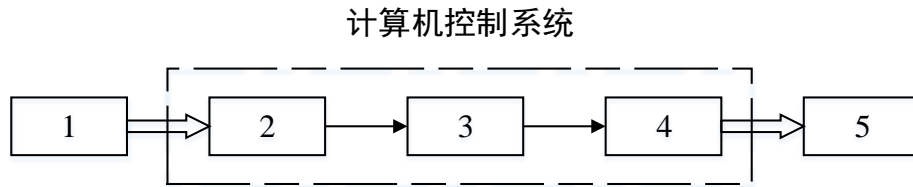


图 3-5 误差补偿系统的组成示意图

1-误差信号检测 2-误差信号处理 3-误差信号建模 4- 补偿控制 5-补偿执行机构

3.2.4.4 误差补偿技术的发展

在精密和超精密加工中，误差补偿技术显示了它的作用和效果，得到了飞速发展和广泛应用。但在误差补偿技术上，存在着两种截然不同的观点。一种观点认为机械产品的精度应靠零件和装配的精度来保证，这是硬功夫，是实实在在的精度，是稳定的，有持久性，对误差补偿采取全面否定的态度。另一种观点认为机械产品的精度要求越来越高，靠机械加工和装配来保证越来越困难，成本也越来越高，而且受到了当前制造水平的限制，利用误差补偿技术可以很方便地将产品的精度在现有水平，上提高一步，有事半功倍之效，对误差补偿持肯定态度。实际上不必将此两种观点对立起来，因为误差补偿应该在一定制造精度的水平上进行，而且受到不少条件的限制，所以第二种观点并没有否定第一种观点，它是第一种观点的补充。

误差补偿技术在精密和超精密加工中已经取得了显著成效，但大多是非实时误差补偿，当前正在进行在线检测与误差补偿的研究，它是精密制造技术、计算机技术、微位移技术、传感技术等多种技术密集的高新技术。

目前，在线检测与误差补偿正沿着以下几个方向发展：

(1) 预报型补偿。由于误差的检测与补偿之间总有一段时间上的滞后，不能形成真正的实时补偿。在动态数据系统（Dynamic Data System, DDS）建模方

法的基础上,创立了预报补偿控制(Fore-casting Compensatory Control, FCC)技术,它利用在线随机建模理论、先进的传感技术、计算机技术、微位移技术等,可以对随机误差进行建模和预报,对动态误差进行实时补偿。实际上,它是时间序列分析、预报与控制在制造技术中的应用。

(2) 综合型补偿。当前的误差补偿技术及其补偿控制系统大多应用在单一加工过程,如车、铣、磨、镗等中,而且是针对工件的尺寸误差、形状误差和位置误差中的单项误差进行补偿控制。现已开展对工件尺寸、形状和位置误差同时进行综合补偿,其中包括对尺寸、形状和位置一种误差中的多项误差进行综合补偿,如圆变和圆柱度的同时补偿;另外,也在加工中心等多功能机床上进行多工种补偿。

3.3 误差补偿实例(非球面工件的误差补偿)

保证零件的加工精度有两条途径。一是通过加工机床来保证,即机床的精度要高于工件所要求的精度,这是所谓的“蜕化”原则,也称“母性”原则。但是在超精密加工中,要制造如此高的超精密加工机床,在技术上有很大难度,耗资也很大。随着零件精度的要求不断提高,要制造精度更高的超精密加工机床,成本将极度升高,这在技术上也变得不大可能。二是在精度比工件的精度要求较低的机床上,利用误差补偿技术,提高加工精度,使加工精度比机床原有的精度高,这是“进化”原则,也称为“创造性”原则。随着零件精度要求的提高,加工的难度越来越大,采用误差补偿技术的意义也越来越重要。因此,在精密和超精密加工中,误差补偿技术已成为重要的手段之一。上述非球面超精密加工就是采取试切法,运用误差补偿技术来实现的。

采用刀具轨迹编程软件,在超精密数控机床上:可加工出亚微米量级形状精度及纳米量级表面粗糙度的非球面镜片。但是由于加工过程中不可避免地存在各种误差因素,工件需要做若干次的面形误差补偿与修正。在超精密加工过程中,产生误差的主要原因有残余应力存在于毛坯内、金刚石刀具磨损以及刀具安装偏心。下面讨论刀具安装偏心造成的面形误差及其补偿与修正。

刀具安装偏心一般分为两类,一类是刀具未到中心,另一类是刀具超过中心。表 3-2 详细说明了刀具的轨迹造成的加工表面面形之间的差异。刀具偏心结果分

为“M形”及“W形”两种面形误差。“M形”误差是指对于凸曲面面形，刀具未到中心，对于凹曲面面形刀具超过中心。相反，“W形”误差是指对于凸曲面面形，刀具超过中心，凹曲面刀具未到中心。

对刀具偏心的补偿距离可由下式得出：

$$\delta x = \frac{8R}{D} R_t$$

式中，R 为非球面对应的最吻合球面半径，D 为非球面光场表面直径， R_t 为表面轮廓最大偏差（峰谷值）。补偿流程如图 3-6 所示。

表 3-1 不同类型刀具偏心所引起表面加工表面面形的改变

	<p>凸曲面面形 刀具未到中心</p>	<p>M形</p>
	<p>凸曲面面形 刀具超过中心</p>	<p>W形</p>
	<p>凹曲面面形 刀具未到中心</p>	<p>W形</p>
	<p>凹曲面面形 刀具超过中心</p>	<p>M形</p>

注：CLw——工件中心线；CLt——刀具中心线

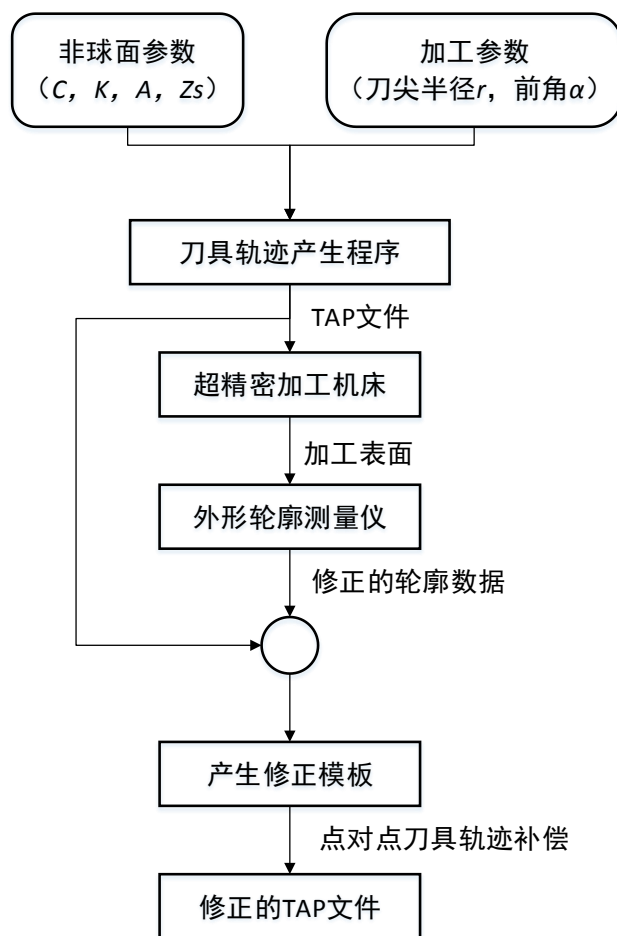


图 3-6 刀具轨迹补偿流程

下面将通过一组试验来进行刀具偏心的误差补偿。表 3-1 列出了通过测试获得“M形”和“W形”误差后，非球面型芯基本参数需要通过刀具轨迹编程软件进行误差补偿的计算量。工件材料为 Ni-Cu（其质量分数为 Ni 29.8%，Fe 0.51%，Mn 0.30%，其余为 Cu），采用 Nanoform 300 超精密加工机床。加工参数为：主轴转速 2000 r/min，切削深度 1 μ m，进给率 5 mm/min。在进行测量时，采用了 Form Talysurf 表面轮廓测量仪。

表 3-2 非球面型芯基本参数误差补偿值

基本参数	补偿值
孔径	4 mm
曲率半径 C	-0.05839900mm ⁻³

最吻合半径	15.209614 mm
圆锥常数	0.0
非球面变形参数 A_4	-4.302×10^{-4}
非球面变形参数 A_6	-2.303×10^{-4}
非球面变形参数 A_8	-2.414×10^{-5}
非球面变形参数 A_{10}	1.263×10^{-5}
矢高	0.13207 mm

三次补偿试验所得见表 3-3。第一次补偿的效果是非常大的，加工精度提高了近一个数量级。第三次补偿已经出现了负的改进效率，即过度补偿。补偿效果与补偿次数的变化趋势如图 3-7 所示。

表 3-3 三次补偿试验所得结果

补偿次序	残留形状误差 $\Delta / \mu\text{m}$	改进效率 $\eta / \%$
0	1.2234	N.A.
1	0.1954	84.0
2	0.1549	20.7
3	0.1994	-28.7 (过度补偿)

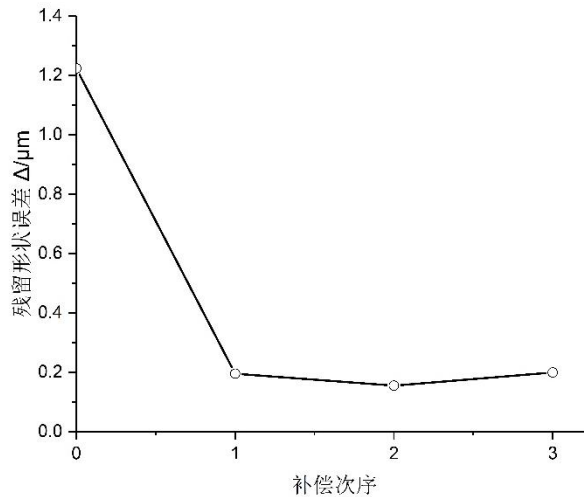


图 3-7 残留形状误差与补偿次序的对应图

图 3-8 为将 TAP 文件数据直接输入超精密数控机床进行误差补偿前后的对比图。

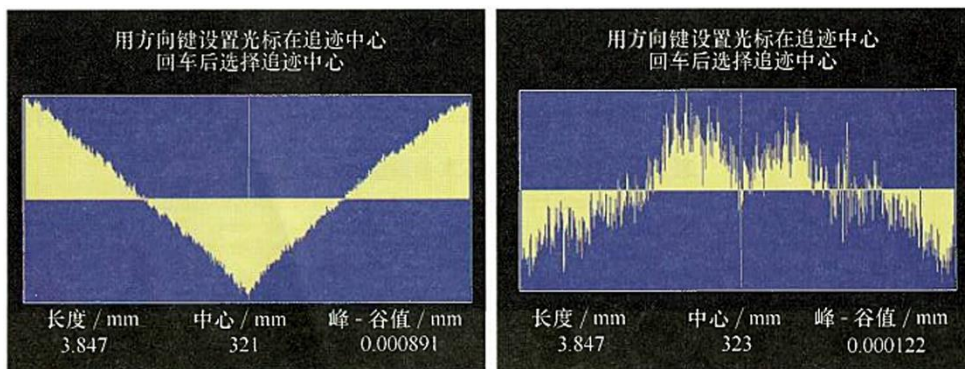


图 3-8 用刀具轨迹编程软件进行误差补偿前后对比图

参考文献：

- [1] 李荣彬; 杜雪; 张志辉, *超精密自由曲面光学设计、加工及测量技术*. 机械工业出版社: 2015.
- [2] 李圣怡, *精密和超精密机床设计理论与方法*. 国防科技大学出版社: 2009.
- [3] 袁哲俊. 精密和超精密加工技术的新进展[J]. *工具技术*, 2006, 40(3): 3-9.
- [4] 郭隐彪, *先进光学元件微纳制造与精密检测技术*. 国防工业出版社: 2014.
- [5] 金碚, *中国制造 2025*. 中信出版社: 2015, p 8-9.
- [6] 藤原洋, *第四次工业革命*. 东方出版社: 2015, p 19-19.
- [7] 布朗尼克; 亨沙; 弟子阿尼, *非球面光学元件的先进制造和应用技术*. 浙江大学出版社: 2011.
- [8] 王毅. *超精密车削工艺研究*. 苏州大学, 2011.
- [9] 江云. *超精密金刚石车床热态特性分析*. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] Cheung, C F; Lee, W B. A theoretical and experimental investigation of surface roughness

formation in ultra-precision diamond turning[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(7): 979-1002.

- [11] Chan, K C; Cheung, C F; Ramesh, M V, et al. A theoretical and experimental investigation of surface generation in diamond turning of an Al6061/SiC p metal matrix composite[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(9): 2047-2068.
- [12] Zhang, S J; To, S; Wang, S J, et al. A review of surface roughness generation in ultra-precision machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 91(76-95).
- [13] Huang, R; Zhang, X Q; Rahman, M, et al. Ultra-precision machining of radial Fresnel lens on roller moulds[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64(1): 121-124.