

现代机床在机测量技术研究与 发展趋势

张建明, 罗松保, 庞长涛, 杜海涛

(中航工业北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室, 北京 100076)

[摘要] 介绍了现代机床在机测量系统的基本构成、功能和效能, 以及普通数控加工、超精密加工和复杂曲面及特殊结构工件加工 3 类场合在机测量系统的特点。阐述了在机测量系统核心技术——测头技术, 重点讨论了各类测头的工作原理、特性、控制系统要求, 以及适用场合。最后, 提出了在机测量系统未来发展方向。

关键词: 在机测量; 测头; 机床

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.043



张建明

研究员, 研究方向为超精密加工、测量、测试与装备制造。主持完成了多项国家重点科技攻关课题、多项国防预研重点课题, 包括国家 863 重点项目、973 子项目等。荣获航空工业总公司“有突出贡献专家”、国防科工委“511 学术技术带头人”、国务院政府特殊津贴等荣誉称号。

随着现代数控加工、传感和测量技术的发展, 机床在机测量(On-machine Measurement, On-machine

Gauging; 或译作在位测量, 在线测量) 技术对提高加工精度、效率和产品质量, 解决离线测量的问题或障碍, 发挥着越来越重要的作用。机床在机测量技术已成为现代先进制造技术的重要发展方向之一。

通用数控机床在机测量技术

1 应用系统构成与效能

利用数控加工中心或车、铣中心等通用数控机床上已有的导轨坐标测量、运动控制系统, 配置适当的刀具检测、工件检测用途的测头, 使机床具备数控多坐标测量机功能。

图 1 所示为典型的在机测量系统结构简图, 其中伺服系统为多坐标伺服系统, 测头在机床加工过程中储存在刀具库, 测量周期中换装在刀具主轴上, 形成数控多坐标测量机系统。工作台上安装刀具测头, 可对刀具主轴上的刀具进行检测。

具有测量功能的扩展机床可实现:

- (1) 利用刀具测头实现自动对刀、刀具破损监测;
- (2) 工件测头识别并设定工件定位状态, 可省去工装卡具, 减少机床停机时间, 消除手动设定误差, 降

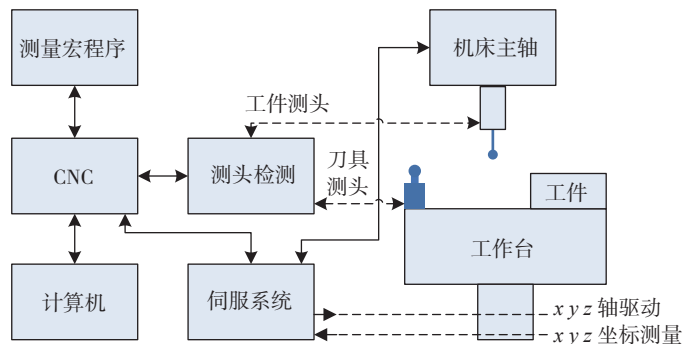


图1 在机测量系统结构简图

Fig.1 Schematic diagram of on-machine measurement system structure

低废品率,提高生产力和批量产品尺寸的灵活性;

(3)通过对工件特征进行有序工件测量,自动修正偏置值,增强无人加工的可靠性、适应性,提供过程反馈,减小变化,利用自动偏置更新进行首件检测,缩短等候首件检测结果的停机时间;

(4)确认成品工件的尺寸等。

2 测头技术

测头技术是在机测量的核心技术。测头的类型和性能将决定整个测量系统可达到的功能、精度和效率等性能水平。

(1)触发式测头系统。

目前,通常的数控机床在机测量系统大多配置触发式测头系统。

触发式测头工作原理如下^[1]:图2所示测针后端3个等分圆柱与测头内6个钢球(或圆柱)精密接触,形成三维空间6个线性无关的精密定位点机构,从而确定了测头坐标系内3个直线、3个旋转坐标6自由度空间位置的唯一向量坐标点。3个钢柱和6个钢球同时又形成了导电回路,检测导电回路导电状态可判断

定位状态。当测球接触工件,改变机构定位状态时,检测电路发出测量触发信号。测量采样触发后,机床数控系统即时锁存各运动坐标测量值,并使运动减速停止,完成一次“飞越”测量过程。

触发式测头应用要点:需采取适当的检测对策,防止非测量态测头定位机构误触发输出。机床数控系统也需依工作状态识别误触发信号。

触发式测头优点:机械结构和检测电路简单,成本低;测针使用、更换灵活、方便;触发力可调,以适应不同材质工件和不同测针的测量要求;支持通过加长组件进行深入特征测量;能够运用星形测针作复杂测量,因而具有很好的空间可探测性(也被称为“万向测头”);可达到较高的探测精度(测头机械精密定位机构重复性可达 $0.1\mu\text{m}$;单向触发重复测量精度为亚微米级;全向触发测量精度为微米级)。

触发式测头缺点主要有:不能进行扫描测量,测量效率较低;受测球半径影响,对于曲率变化大的复杂工件形面的测量适应性差,甚至不能

有效测量;受接触测力影响,不适合软材料工件测量。

(2)测头信号传输方式。

在机测量系统的构建首先需要解决测头信号传输的问题。当采取刀具主轴换装测头的方案,测头信号传输必须为无线传输方式。根据机床结构特点和工作方式,测头信号传输方式可分为有线和无线两类。

有线式传输成本低、可靠性高、实时性好,应尽量采用。如某些机床对刀测头、某些车削中心刀塔安装的工件测头采用的是有线传输方式。

早期的无线传输方式有感应传输式、红外传输式等。感应传输式成本低、可靠,但传输距离短,近年来使用较少。红外传输测头使用灵活,应用较广。红外测头传输距离较远,但有光路被干扰或被挡而使系统失控的危险。为使传输可靠,技术上可采用调制光学编码传输,使其具有抗光干扰和通道监测能力。近年来,国内外还开展了多种适合加工场合的无线传输技术的研发,如WIFI、蓝牙、无线电跳频等传输技术^[1]。

目前,已获得应用的有无线电跳频传输系统(图3)。跳频(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)是一种独特的无线电传输系统,无需使用专用无线信道。测头和接收器以连续的频率同步跳动,因此允许多个测头系统和其他工业设备共存。

超精密机床在机测量技术

超精密加工技术在现代高科技和武器装备研发和生产中发挥着越来越重要的作用。这些装备系统中的一些现代光学元件,除了超高的加工精度外,常常需采用一些特殊材料(金属基等)和特殊形状(非球面、自由曲面等)的结构。对于这类零件,通常的加工机床和测量技术手段往往难以满足或实现加工要求。

为此,一种集当代多领域最先进技术,以确定性加工方式工作的

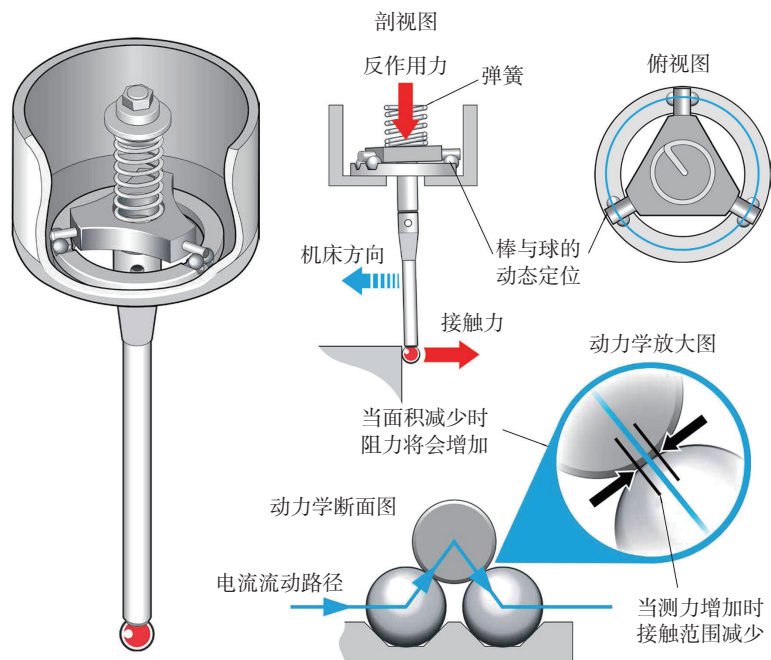


图2 触发式测头测针定位机构及工作原理

Fig.2 Positioning mechanism and working principle of trigger probe stylus

超精密机床发展起来。这类机床的典型代表为单点金刚石车床(Single Point Diamond Turning, SPDT),其中美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)研制的大型光学金刚石车床(Large Optics Diamond Turning Machine, LODTM)代表了当今机床的最高精密水平。LODTM可加工直径达2100mm,重达4500kg的工件,其加工面形精度最高可达 $0.028\mu\text{m}$,表面粗糙度可达3.5~9nm。

图4所示为中航工业北京航空精密机械研究所研制的Nanosys-1000 LODTM机床和在机平面度、直线度轮廓测量系统。该机床

通过纳米(1nm)级分辨率的超精密加工运动轨迹控制,用金刚石刀具直接车削成形金属、红外等材料的大型光学镜面。该机床可高效地加工传统光学加工技术和装备难以或无法加工的多种材料(如金属基、红外、KDP等)和复杂曲面(深度非球面、离轴非球面等)的现代光学系统元件。

对于确定性超精密加工技术而言,在机测量技术的研发则显得尤为迫切和重要。通常在机测量技术主要用于提升加工效率。而在超精密加工场合,则常常是解决能否实现的问题。典型的事例是研发的机床已达到极高精度,但没有合适的测量

仪器或手段用来测量被加工件(如非球面光学元件),只能利用机床本身的精度构建在机测量系统,才能实现对此类零件的在线检测。虽然有离线测量手段,但由于工件加工、测量过程中的重新装卡会相应地引入重复定位误差,从而破坏超精密加工过程的误差收敛。

1 超精密在机测量测头技术

超精密在机测量的要求非常高,光学元件面形精度为亚微米级甚至更高;表面粗糙度为纳米级或更高。为此,常用的触发式测头性能已远远不能满足使用要求。

高分辨率、高稳定、高线性、低测力(或无测力)测头系统是超精密机床在机测量系统发展的关键技术。

目前,超精密加工对象主要为光学元件,超精密在机测量主要有两种方式:接触式微位移电感测头对刀、检测及工件面形轮廓扫描测量;非接触式激光波面干涉测量。

2 电感测头超精密机床在机测量技术应用

目前,对刀和轮廓扫描测量测头主要采用接触式超精密电感微位移传感器。测头测量分辨率可达1nm,在测量状态控制(如温度稳定性、时间稳定性等)的条件下,微位移测量精度可达数纳米。

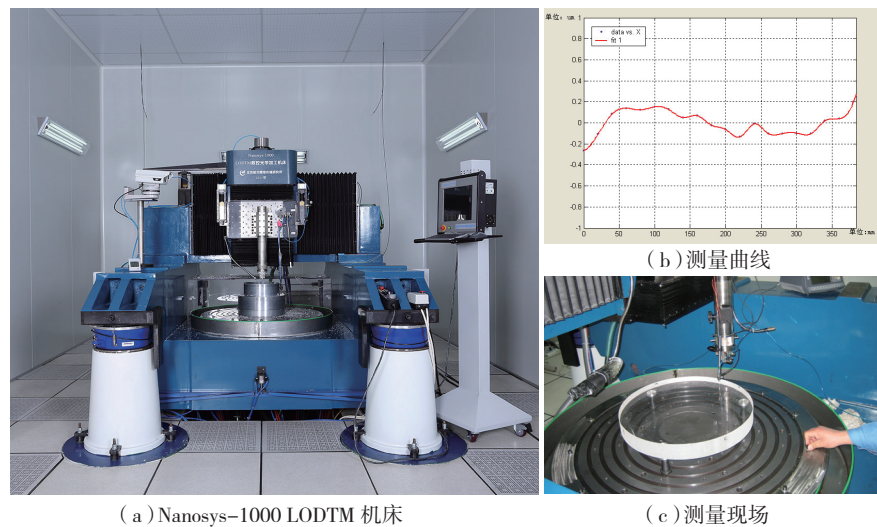
图5所示Nanosys-300是中航工业北京航空精密机械研究所研制的非球面超精密复合加工机床。其中,对刀和工件测量采用的是气浮式超精密电感测头。气浮式测头具有测力小且恒定的优点。

图6所示为Precitech公司Nanoform超精密加工机床及其气浮电感测头在机工件测量装置^[2]。电感测头与单点金刚石刀具安装在同一刀架拖板上。加工和测量过程中,工件不需多次重复装卸,实现了加工、测量过程的一体化。其中加工件为非球抛物面,测量系统可对加工零件面形进行自动测量、分析、校正和



图3 跳频无线传输触发式测头系统应用

Fig.3 Application of FHSS wireless transmission trigger probe system



(a) Nanosys-1000 LODTM 机床

(c) 测量现场

图4 Nanosys-1000 LODTM在机测量系统

Fig.4 On-machine measurement system of Nanosys-1000 LODTM

调整加工工艺参数。

图 7 (a) 所示为 SPDT 机床测量、加工校正前的面形轮廓精度 $P_1=0.3886\mu\text{m}$; 图 7 (b) 所示为 SPDT 机床测量、加工校正后的面形轮廓精度 $P_1=0.1531\mu\text{m}$ [2]。

图 8 所示为美国 LLNL 研制的号称世界最高精度的 LODTM 机床。为机床配置的电感测头对机床加工的 KECK 深空望远镜二次反射非球面镜进行在机扫描测量, 镜面面形轮廓测量精度值为数十纳米。

3 激光波面干涉在机测量技术应用

图 9 所示为法国 REOSC 公司的光学元件加工、测量一体化设施。其中数控研抛机床上 30m 高的塔中安装有激光波面干涉仪。激光波面干涉测量精度在理想的状态下, 可达几分之一波长, 甚至几十分之一波长。

复杂及特殊形状工件在机测量技术

触发式测量系统适宜由平面、圆柱、孔、球等简单几何形状元素构成工件的加工应用。但当测量对象为涡轮叶片等复杂面形需要采用大数据表征时, 由于测头的特点和工作方式的限制, 系统的测量效率将变得很低。而对于微小结构(如雕刻表面等), 由于测球直径的影响, 难以胜任相应的测量工作。

超精密在机测量系统中的线性电感测头或激光波面干涉测量仪适合简单形状(如回转类光学元件)工件的高精度测量, 不适合构建复杂及特殊形状工件在机测量系统。

随着现代科技发展, 复杂及特殊形状零件的应用和在机测量技术的研发需求日益迫切。此类零件在机测量技术研发的关键是适应各种测量、控制要求的新型测头、多轴控制系统及其应用技术。

1 3D接触式扫描测头及其应用

触发式测头“飞越”测量状态可控性差, 误差因素多。接触式高分辨

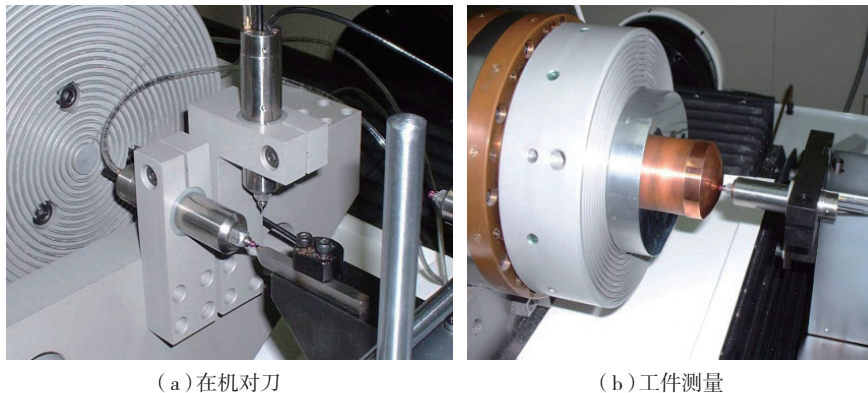


图5 Nanosys-300机床在机对刀和工件测量
Fig.5 On-machine tool setting and work-piece measurement of Nanosys-300

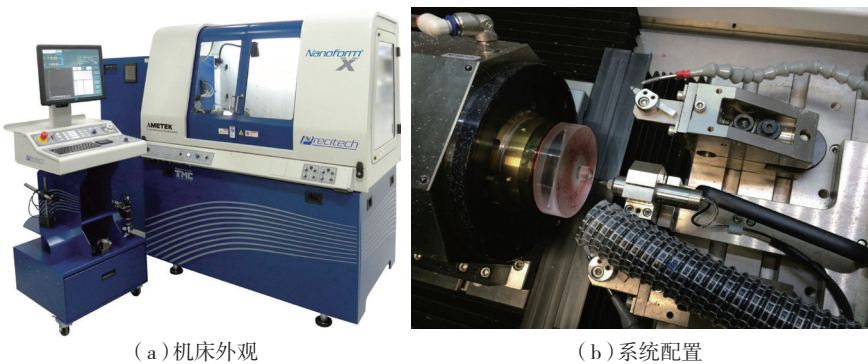


图6 Precitech公司SPDT机床
Fig.6 SPDT lathe of Precitech

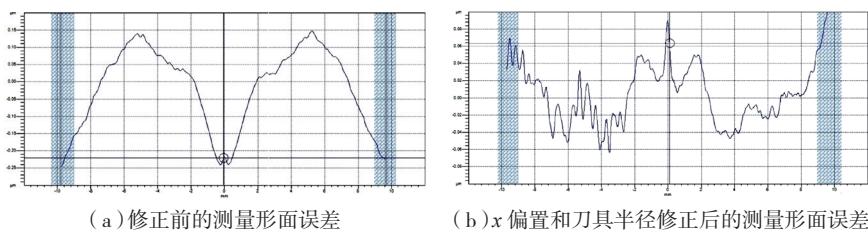


图7 SPDT机床在机测量、加工校正前后的面形轮廓精度
Fig.7 Measured form error before and after correction in SPDT lathe with on-machine measurement

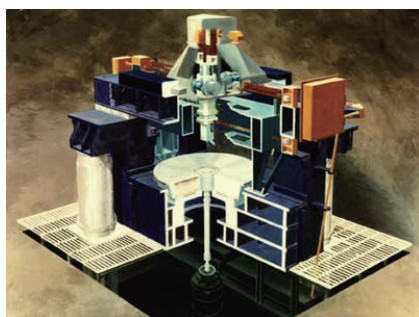


图8 美国LLNL研制的LODTM机床
Fig.8 LODTM developed by LLNL

率、微位移测头易于实现测量状态控制, 常用以搭建高精度的测量系统。

目前, 计量型的高精度三坐标测量机常采用这种特性的精密 3D 接触式扫描测头。

3D 接触式扫描测头装有高分辨率、高精度的 3D 传感器和偏移测力控制机构。3D 机构高各向同性(力-位移), 能实现对测量曲面法线的识别和测力控制。

图 10 所示是一种 3D 接触式扫描测头的结构简图和外形 [3]。测头采用 3D 激光微位移传感器。目前, 主要的计量型三坐标测量机厂家多

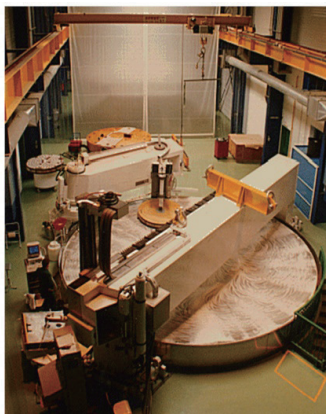


图9 法国REOSC公司超大型光学反射镜加工与激光波面干涉测量一体化装置
Fig.9 Integrated system of large optical reflector manufacture and wave laser interferometer developed by REOSC in France

采用3D电感微位移传感器。

这种计量型测量机可实现非常高的测量精度(亚微米至微米级),并达到较高的测量效率。所以,常被用来对叶片类复杂零件产品进行高精度的质量终检。

3D接触式扫描测头可实现对复杂曲面工件的法向变位测力控制。为实现这种测量,运动控制将对系统性能提出非常高的要求。当这类测头用于在机测量系统时,还需解决测头安装机构的适配问题。未来这类测头在机测量系统的应用将主要面向一些特殊和高端制造场合。

接触式测头不适合软材料工件的测量。3D接触式扫描测头比触发式测头测量效率高,但测量速度仍然受限于接触测量状态。对于精度要求不高,但强调测量效率的场合,非接触测量的优势就突显出来。

2 光学扫描测头技术及其应用

光学扫描测头为非接触式测量方式,可实现快速采样,比接触式扫描测头效率更高。此外,聚焦型的激光测头还可形成极小的测量光斑,分辨率可达10nm,适合微小结构零件的测量。

光学测头及其应用技术已成为复杂及特殊形状工件高效测量系统

的发展重点。这类测头具有代表性工作原理有:

(1)三角测距方式激光测头。

如图11(a)所示,半导体激光发出的激光束照射在目标上。接收器透镜聚集目标反射的光线并聚焦到感光元件上。当与目标之间的距离发生改变时,通过接收器透镜的反射光的角度会随之改变,光线聚焦在感光元件上的位置也有所不同^[4]。

图11(b)所示已扩展成谱带形的激光束在目标表面发生漫反射。反射后的光落在CMOS感光元件上,这样就可以通过检测反射后位置和形状中的变化来测量目标表面上各个点的位置。由此,线扫描测头扩展成面扫描测头。

三角测距激光测头对工件材料适应性强、工作距离和测量范围大(可达1~750mm),应用广泛。但测量精度易受测量光束与工件测量面之间夹角限制,也易受工件反光影响。

对于复杂曲面测量,为获得最佳测量效果,应保持测头发射光束垂直于测量面(法线方向)。在实际应用中,要实现这种最佳扫描测量的五轴运动控制和编程,还具有相当大的技术难度。

针对三角测距方式激光测头测量入射角小、反光影响大的问题,一种新式的双眼三角测距方式激光测头被研发出来^[5]。如图12所示,测头中间的孔为激光发射孔,旁边两接受传感器光孔轴角度对称于中间孔。

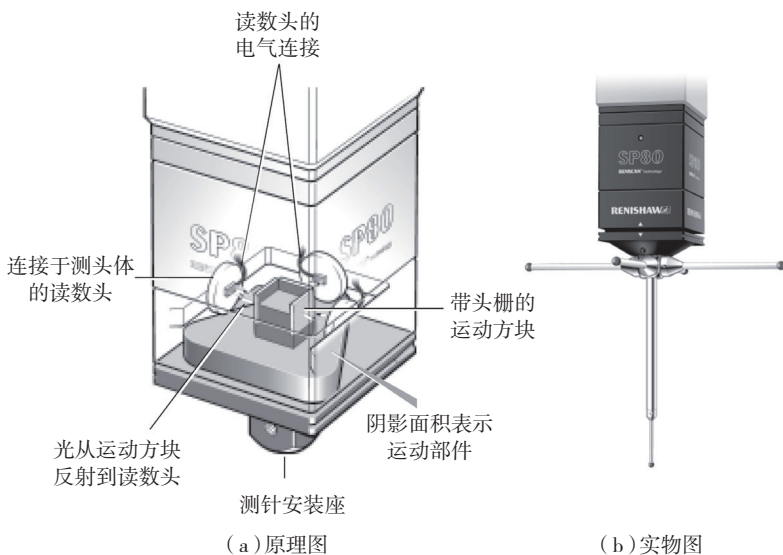


图10 3D接触式扫描测头
Fig.10 3D contact scanning probe

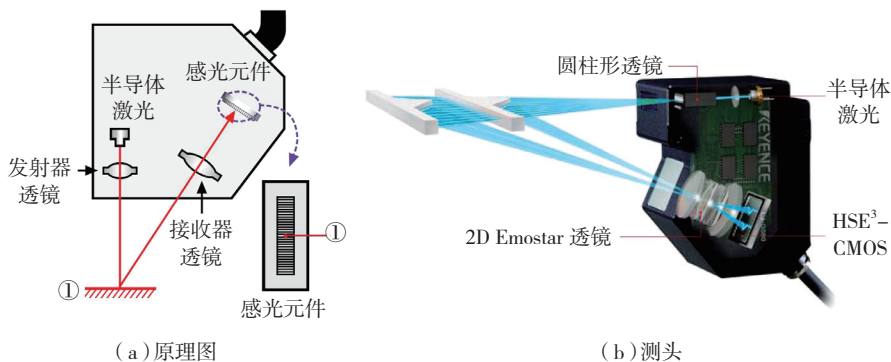


图11 三角测距方式激光测头
Fig.11 Laser triangulation measurement probe

采用双眼激光测头,在某些应用场合可降低对测量控制编程的难度,并仍能达到较好的测量精度。图 12 所示测量系统对涡轮叶片的横截面轮廓进行扫描测量。叶片的每个截面轮廓法线在一定角度范围内连续变化。在测量某一截面时,调整测头俯仰角为该横截面轮廓法线俯仰变化角度中值,并调整测头高度使光束焦点落在截面轮廓线上。在该截面轮廓的编程自动扫描测量过程中,测头高度和俯仰角不变,使复杂曲面扫描测量简化成三轴联动控制。由于双眼测头的两个传感器具有测量角互补效果,从而提高了曲面测量入射角限和测量精度,降低了曲面扫描测量运动控制的难度。

(2) 共焦测距测头。

测头镜头有固定的焦距。当测头与工件测量距离为焦距时,激光束聚为一点。测量偏离焦距时,光线逐渐变模糊,这样就确定了对焦位置。某些共焦原理测头使用音叉实现镜头的上下移动。对焦位置确定了反射光量最强时音叉(镜头)的高度,通过内部传感器读取此时的音叉(镜头)位置,即可测量与目标物的距离(图 13)。由于是测量对焦高度,因



图12 双眼三角测距激光测头涡轮叶片扫描测量

Fig.12 Turbine blade scanning measurement with double eyes laser triangulation measurement probe

此可不受目标物材料、颜色和倾斜等的影响实现准确测量。

激光共焦测头测量焦点小,角度特性优良,但测量范围较小(如某产品系为 0.6~2mm),适合微小(细)复杂表面工件的测量。

图 14 所示为新一代光谱共焦式测头^[6]。光谱共焦位移传感器由光源射出一束宽光谱的复色光(呈白色),通过色散镜头发生光谱色散,形成不同波长的单色光,每一个波长都对应一个到被测物体的距离值。测量光射到物体表面被反射回来,只有满足共焦条件的单色光,可以通过小孔被光谱仪感测到,通过计算被感测到的波长,换算获得距离值。

测头系统由控制器和探头组成,它们由一根光纤连接光源(如氙灯),与振荡调焦透镜系统相比,光谱共焦测头使用的是无磨损透镜系统设计,可设计成微型测头。使用直径为 4mm 的光谱共焦微型探头,可测量狭小腔体、深槽和钻孔的尺寸。该类测头线性量程范围为 0.4~6.5mm(某产品系列参数)。

(3) 锥光偏振激光测头。

锥光偏振激光测头^[7]基于锥光偏振全息术,通过工件上的反射光线在晶体上的不同表现进行长度的

测量(图 15)。锥光偏振全息术接收同轴反射的激光。同轴性的特点使得测量范围大大增加,可谓“可看见的,就可以测量”。因此,锥光偏振激光测头对突变表面、陡斜轮廓、深小孔及盲孔测量(角度: ± 85°)具有独特的优势。但这种测头的工作距(典型系列产品:20~200mm)和测量范围(1~100mm)越大,测量精度(3~70 μm)也就随之降低。

未来发展

从在机测量技术研发趋势看,未来该项技术将不断提高测量精度和效率,特别是满足各种超高精度,以及复杂和特殊工件测量应用需求方向发展。其主要方面有:新型在机测量系统原理和方法;各类特殊应用适应性新型测头的研发;复杂曲面在机测量多轴联动控制技术和系统的研发;各种特殊工件对象的专用加工、测量一体化装置;以及针对对应于各种特殊测量对象的测量控制和测量数据处理软件的开发等。

未来技术发展的某些典型应用:

(1) 在复杂曲面工件在机测量方面,如先进航空发动机制造中,涡轮叶片在机加工、测量一体化技术(图 16)。

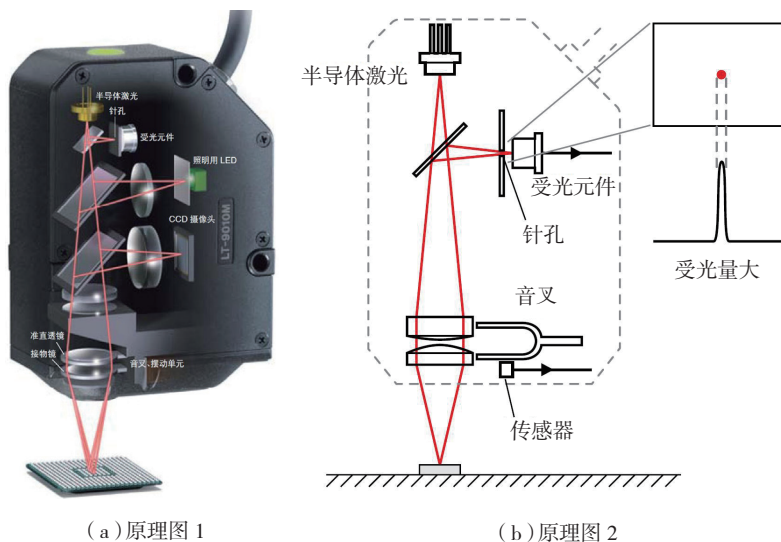


图13 激光共焦测距方式测头原理图

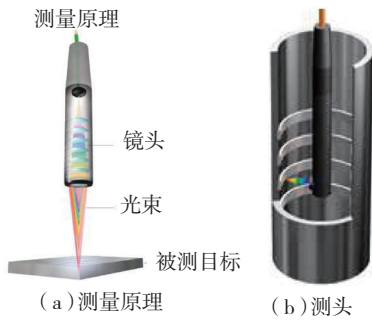


图14 光谱共焦测距方式测头
Fig.14 Chromatic confocal probe

(2) 在特殊结构工件在机测量方面,如涡轴发动机薄壁细长阶梯主轴、飞机起落架轴等工件的在机加工、测量一体化等技术。对于这类工件中深腔内小孔测量难题,图14所示的微型化光谱共焦测头的应用研发提供了一种可行的途径。

(3) 在大型超精密工件加工方面,如航空航天遥感、深空探测等系统中大型光学主镜加工,为了减少振动、环境气流扰动等加工环境对波面干涉测量系统精度的影响,近年来研发的4D动态波面干涉测量技术展示了潜在的重要应用前景。

参考文献

[1] RENISHAW. Probing systems for CNC machine tools[EB/OL]. [2016-04-01]. <http://www.renishaw.com/contact>.

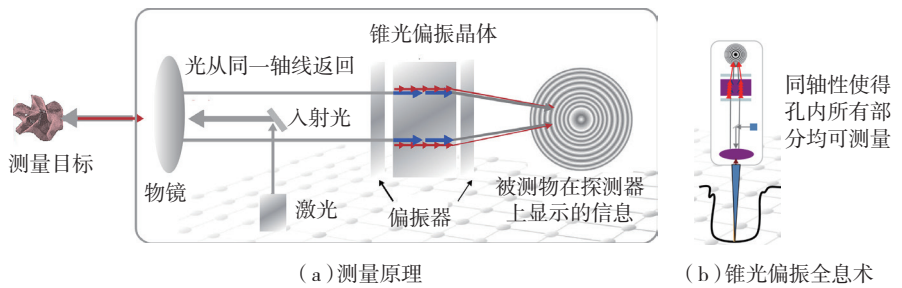


图15 锥光偏振测距式测头
Fig.15 Polarized conoscopic probe

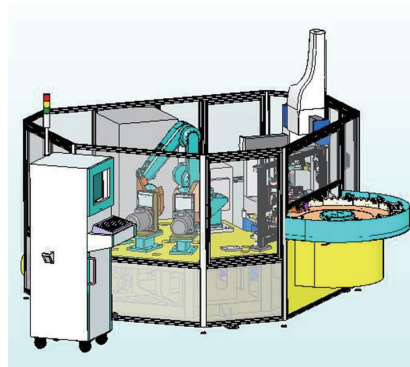


图16 发动机叶片进排气边智能精密加工与检测装置示意图
Fig.16 Schematic diagram of smart precision machining and measurement setup of leading edge/trailing edge of engine blade

[2] AMETEK Precitech. Automated form error correction[EB/OL]. [2016-04-03]. <http://www.precitech.com>.

[3] RENISHAW. Probing systems for coordinate measuring machines[EB/OL]. [2016-03-20]. <http://www.renishaw.com>.

[4] 基恩士(中国)有限公司. 激光位移

传感器测量原理[EB/OL]. [2016-04-07]. <http://www.keyence.com.cn>.

KEYENCE (China). Measurement principle of laser displacement sensor[EB/OL]. [2016-04-07]. <http://www.keyence.com.cn>.

[5] 温泽测量仪器(上海)有限公司. CORE-DS[EB/OL]. [2016-03-27]. <http://www.wenzel-cmm.cn>.

WENZEL Scan Tec. (Shanghai). CORE-DS[EB/OL]. [2016-03-27]. <http://www.wenzel-cmm.cn>.

[6] 米铨(北京)测试技术有限公司. Confocal DT- 光谱共焦式测量系统[EB/OL]. [2016-04-05]. <http://www.micro-epsilon.com.cn>.

MICRO EPSILON (Beijing). Confocal DT-spectral confocal measurement system[EB/OL]. [2016-04-05]. <http://www.micro-epsilon.com.cn>.

[7] 斯科迪光电设备(上海)有限公司. Cono点激光高精度传感器[EB/OL]. [2016-03-25]. <http://www.scan-direct.com.cn>.

Scan Direct Ltd. (Shanghai). Conopoint laser high precision sensor[EB/OL]. [2016-03-25]. <http://www.scan-direct.com.cn>.

Research and Development Trends of On-Machine Measurement Technology on Modern Machine Tools

ZHANG Jianming, LUO Songbao, PANG Changtao, DU Haitao

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing Technology, AVIC Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

[ABSTRACT] The basic figuration, functions and efficiency of modern on-machine measurement system, and their corresponding application features in general CNC machining, ultra-precision machining, complex curves and manufacture of work-pieces with special structure are introduced in the paper. Concerning the probe technology, the key technology of the on-machine measurement system, the working principle, performance, requirements of control system and application fields of various types of probes are mainly discussed. Finally, the development trends of the on-machine measurement system are also put forward.

Keywords: On-machine measurement; Probe; Machine tool

(责编 李丹)