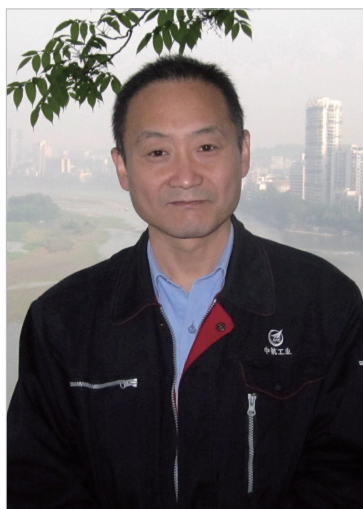


精密坐标测量技术的发展及应用

Development and Application of Precision Coordinate Measuring Technology

中航工业北京航空精密机械研究所 房建国 胡成海 庞长涛 刘勇 王磊



房建国

中航工业精密所研究员,中航工业基础院超精密加工技术首席专家。长期从事精密、超精密加工与检测技术研究;目前主持光学扫描精密坐标测量技术、压气机叶片进排气边高效精密检测与自动化磨削等项目研究。

测量测试是机械制造技术重要的组成部分,测量是机械制造的眼睛,测量技术的先进性反映了产品的先进性。精密测量测试技术不仅对产品质量控制起决定作用,在现代高档数控和智能技术为主导的制造系统中,测量测试技术直接参与精密

坐标测量技术从点触发测量到接触扫描,再到正在迅速发展的非接触扫描测量,效率越来越高。不同类型的测头同时使用或交替使用,是当前重要的发展方向,是当前测量机技术发展的前沿技术趋势。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.07.038

制造过程,并对制造水平起到决定作用。这里谈谈几何量(几何尺寸、型位误差等)精密测量测试技术的发展状况和趋势,尤其是在航空制造中,光学扫描测量技术的最新发展和应用技术。

近年来,在航空制造复杂零件测量领域,国外的光学扫描坐标测量机发展十分迅速。坐标测量技术从点触发测量到接触扫描,再到正在迅速发展的非接触扫描测量,效率越来越高。不同类型的测头同时使用或交替使用,是当前重要的发展方向,是当前测量机技术发展的前沿技术趋势。精密测量测试技术配套技术发展,包括非接触光学扫描测头、多轴坐标测量机及其控制系统、通用测量测试评价软件等,国内产品水平仍有较大差距。

坐标测量技术的发展

1 坐标测量机

坐标测量机(Coordinate Measure Machine, CMM)作为一种典型的通用高精度数控测量仪器,广泛用于机械制造领域。它可以进行零部件的尺寸、形状和位置精度的检测。由于它通用性强、测量范围广、精度和效率高,并能与数控加工系统组成柔性制造系统。坐标测量机作为一类大型精密测量仪器,有“测量中心”之称。

在复杂零件的精密测量领域,坐标测量机是主要的手段。测量机以其精度高、柔性等特点在现代化的生产制造中起着越来越重要的作用,属于自动化生产和柔性制造中一个重要的组成部分。其不仅能够完成

各种零件的几何元素、曲线和曲面的测量,还可以和其他加工设备,如加工中心、数控机床等联机组集成系统,实现设计、制造和检测的一体化。

目前,国外著名的测量机厂家主要有 Hexagon 公司、德国的 Zeiss 和 WENZEL 公司、意大利的 Coord3 公司、英国的 IMS 公司、美国的 OGP 公司、日本的 Mitutoyo 公司等;国内的测量机厂家主要有中航工业精密所、西安爱德华公司等。中航工业精密所的大型龙门测量机(见图 1)和 Hexagon 公司的移动桥是典型的测量机结构。



图1 中航工业精密所大型龙门测量机

测量机在追求精度的同时,需要不断提高环境适用性,德国 Zeiss 公司开发出的 Eclipse 550 小型 CNC 测量机,专门为车间测量而设计,采用了热不灵敏的陶瓷技术,使得测量机的测量精度在 17.8 ~ 25.6℃ 的范围内基本可不受温度影响;Hexagon 旗下公司所开发的检测装备 Chameleon CMM,能以较快的速度实现单点和扫描模式的转换。随着科学技术的不断进步和适应现代化生产的需要,检测装备不断向高精度、高效率、多功能和低成本的方向发展,其各组成部分也都在传统技术的基础上不断发展。其主要发展趋势可以概括为以下几方面:

(1) 机械结构。

为了提高测量机的精度与效率,在机械结构设计上,采用降低运动重心和减轻运动部件质量的方法,提高

系统动态性能和运动速度;既满足了传统精度要求,又适应了生产节奏不断加快而提出的效率要求。

(2) 测头系统。

在测头方面,传统的产品包括 RENISHAW、Zeiss、Hexagon 等公司研制的接触测头。在最新的测头技术中,采用了固态传感器技术,大大减少了测量误差,特别减少了在使用较长测杆时由于预行程变差所引起的误差。

(3) 控制系统。

在控制系统方面,传统的产品包括 Pantec、UCC 等。为了提高与制造系统的兼容与匹配,必须要求测量机具有开放式的控制系统,具有更大的柔性和适用性。同时,多轴(四轴或四轴以上)联动控制有利于扫描测量的高精度实现。

(4) 测量软件。

在测量软件方面,传统的产品包括 RationalDMIS、PC-DMIS、Quindos 等。为了将检测装备纳入生产线,需要发展具有网络通信、建模、反向工程功能模块的软件;同时完善应用于不同类型工件的专用测量软件的开发和使用。

2 非接触坐标测量技术

光学扫描测头应用于三坐标测量机上已有 20 余年,测量精度从开始时的数十微米左右发展到现在的

数微米。光学坐标测量种类和方法很多,包括:点结构光扫描、线结构光扫描、平面影像测量及三维影像合成等。影像测量已广泛应用于坐标测量,在测量二维尺寸方面具有优势,但对三维复杂曲面测量能力有限。

测量机上对叶片等三维复杂曲面测量主要依靠结构光测头,即投射光束到工件表面,形成被测点云要素。投射的光束包括线结构光和点结构光。点光测头投射光点到工件表面,对工件表面进行逐点扫描,相对线扫描方式效率较低,但测量精度可以达到 10 μm 左右,在测量精度上具有优势,对航空制造测量精度要求较高的场合更适用。

目前,光学扫描坐标测量精度虽然比接触测量精度仍有差距,但相比过去数十微米的测量精度已经大幅提升,所以这里仍然称之为“精密”坐标测量技术。

在 2010 年,德国的 WENZEL 公司率先推出了首款航空发动机叶片多轴高速白光检测装备 MAXOS/CORE,如图 2(左)所示。其采用白光点扫描测头,采点速度可达 4200 点/min;其光点直径可小至 9 μm,能够测量到叶片表面非常微小的几何特征,最大限度地降低了叶片实测表面的失真度;并且有效规避了激光



图2 WENZEL五轴测量机和 NEXTEC光学扫描测量机

测头具有的散斑效应以及反射光信号强度等问题,适用于各种表面的叶片测量。

以色列 Nextec 公司近年推出的环形激光三角法测头,测量重复精度可以 $2\mu\text{m}$,基于此测头的扫描测量机,空间测量精度达到 $12\mu\text{m}$ (2σ),在航空制造领域,尤其是叶片快速检测,取得了较好的应用。德国 WENZEL 公司的五轴白光扫描测量机和以色列 NEXTEC 公司的光学扫描测量机近年已经进入中国市场,如图 2 所示。

近年来,光学测头凭借其非接触、高精度等优点,已经广泛应用于工业制造领域,并逐步引起了国内一些科研院所的关注,国内对于光学测头的研究起步较晚,目前,有多家高校、研究机构正研制高精度光学扫描测头。

3 在线测量技术

广义在线测量是指在加工生产线中进行测量,通常提到的在线测量是狭义上的,指在机床内部加工过程中的测量。在线测量技术实现了零件加工后直接进行测量,能够减少二次装夹误差,提高效率。对于难加工材料或者难于装夹找正的大型工件,在数控加工过程中需多阶段加工和反复测量,在线测量意义重大。

随着在线测量技术的发展,测量已不仅仅是最终产品质量评定手段,更重要的是为产品的设计和制造过程服务,使产品的设计、制造过程和检测手段充分集成,形成加工检测一体化“智能制造系统”。测量的方式从传统的“离线”测量,进入到制造现场,参与到制造过程,实现“在线测量”,真正做到“加工即可测可知”。

在线测量技术在测头信号传输方式上从红外传输向无线传输发展,在测量方式上从接触触发向接触扫描和非接触测量发展。中航工业精密所近年率先开发了光学在机(在线)测量系统,如图 3 所示。

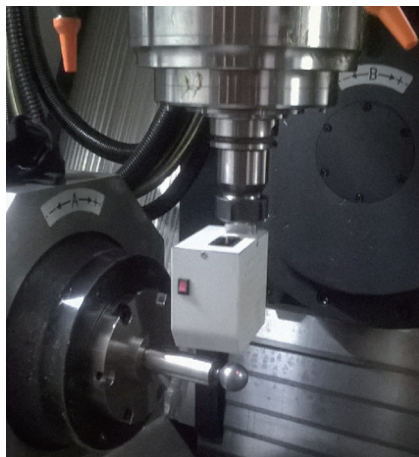


图3 中航工业精密所光学在机(在线)测量系统

4 其他专用测量技术

除上述传统坐标测量技术外,一些适合特定应用场合的专用测量技术也在快速发展,包括关节臂测量、激光跟踪仪、室内 GPS 等。

关节臂式坐标测量系统由多个关节构成,安装有测量探头的测量臂为测量端,可由人牵引在物体表面滑动扫描。机械臂的关节上装有角度传感器,可以实时测量关节的转动角度,根据臂长和各关节的转动角度计算出测量点的三维坐标。

关节臂式坐标测量系统的主要优点有量程大、体积小、重量轻、可在现场进行测量,甚至装在被测工件或机器上。由于其柔性的特点和采用人手操作,与正交式三坐标测量机相比,测量速度快,且无需考虑路径优化等问题,因此使用更加灵活、快捷。

激光跟踪测量系统是工业测量系统中一种高精度的大尺寸测量仪器。由激光跟踪头(跟踪仪)、控制器、用户计算机、反射器(靶镜)及测量附件等组成。激光跟踪测量系统的工作基本原理是在目标点上安置一个反射器,跟踪头发出的激光射到反射器上,又返回到跟踪头,当目标移动时,跟踪头调整光束方向来对准目标。同时,返回光束为检测系统所接收,用来测算目标的空间位置。

激光跟踪仪不仅可以实现空间静止目标的三维高精度测量,而且

可以实现运动目标的跟踪测量。激光跟踪仪操作简便,测量精度高、效率高,可以实时扫描测量和三维点云显示,是大尺寸工业测量的主要手段之一,近年来得到迅速发展和广泛应用。

室内 GPS 测量系统基于全球卫星定位系统的技术概念提出。安装在装配车间的室内 GPS 系统,继承了全球定位系统发射器(卫星)与各接收器相互独立工作的概念。室内 GPS 系统由许多发射器和接收器构成,发射器发射的信号由接收器接收,从而获得接收器相对于发射器的水平方位角和垂直方位角。

室内 GPS 在测量空间有较大的自由度,可以根据需要设计它的型号以便适应测量空间,GPS 的测量范围能达到 $2\sim 300\text{m}$ 。由于反射器和接收器之间的信号是单向传输,因此接收器的个数没有限制。只要对于某个接收器能同时接收到两个以上的发射器发射的信号,就可以确定接收器的空间坐标。

航空典型零件的测量技术需求

1 叶片型面及进排气边测量

光学扫描坐标测量的典型应用之一是发动机叶片型面及进排气边的快速精密测量。叶片是航空发动机中形状复杂、尺寸变化大的零件,叶片的加工质量决定着发动机的工作性能。叶片的型面和进排气边对发动机的能量转换效率有着巨大的影响,但是,在发动机零部件的检测中,叶片型面和进排气边的检测是目前仍然没有很好解决手段的瓶颈环节。随着发动机性能的不不断提升,叶片型面检测精度要求也越来越高,检测工作量巨大,对检测效率要求很高,传统的接触触发式坐标测量机不能满足生产需求。

目前,叶片检测主要依赖于传统的接触式坐标测量机。接触式三坐标测量机采点速度慢,测量效率低;

空间复杂曲面的测量采点数量巨大,单点触发式测量效率很难大幅提升。接触式测量由于测尖球头的存在,对尺寸很小的零件特征(例如叶尖半径为0.2mm的叶片边缘等)的测量误差很大,甚至根本无法测量,接触式坐标测量用于叶片进排气边的检测功能十分受限。

目前为止,针对压气机进排气边检测,各厂家大多采用光学放大镜头测法、气动多点叶型检查仪、光学投影仪、光学跟踪叶片型面检查仪、水柱差压式气动量仪、标准样板光隙法以及叶片型面光学机械仪等。因此,研究和研制发动机进排气边缘专用高效、精密检测坐标测量机尤为重要,在获得检测数据的同时,还可以把检测结果反馈于加工,有利于提高叶片边缘的加工质量,提高其空气动力学性能。中航工业精密所研制了光学扫描测量机,用于叶片及进排气边检测。

2 整体叶盘测量技术

整体叶盘结构复杂,叶片型面为复杂自由曲面,叶盘薄、弯曲角度大、形状复杂、精度要求高,相邻叶片之间的通道深而窄、开敞性差,因此造成整体叶盘测量难度大。如何高效、高精度完成整体叶盘测量一直是测量技术所面临的难题之一,传统的测量方法是利用三坐标测量机携带不同规格的接触式测头在叶盘上对每个叶片进行逐点测量,测量速度慢,效率低,无法满足整体叶盘快速、高效检测需求。随着测量技术的发展,扫描测头技术的应用,多轴接触式快速扫描测量在整体叶盘测量中得到了快速的发展。高精度多轴测量机、专业分析和评价软件是整体叶盘测量必备条件。

整体叶盘测量实现途径有两种:一种是带精密转台的测量机配备旋转测头座和接触式扫描测头实现叶盘型面的快速测量,利用 Blade 等叶片评估软件完成测量结果分析。另

一种是采用 RENISHAW 公司 REVO 测头,利用 Renscan 五轴扫描技术,实现整体叶盘高速扫描测量,速度高达 500mm/s。专业 APEXBlade 软件快速生成五轴测量 DMIS 程序、SurfitBlade 软件计算和报告叶片截面轮廓,采用 REVO 测头的扫描测量已经开始应用于整体叶盘,如图 4 所示。



图4 整体叶盘测量

3 微小精密零件测量技术

微小精密零件的特征包括微孔、微锥面和微螺旋槽,发动机燃烧室燃油喷嘴是典型的微小精密零件。针对喷嘴的微小复杂结构特点,采用非接触测量模块和接触式微孔测量专用模块相结合的方式对喷嘴的微孔、微槽和微锥进行测量。

非接触测量模块采用中航工业精密所研制的 Agility 小型多轴非接触测量机来实现。该模块采用“三直线轴+转台”的多轴快速运动机构,加速度大、速度快,最高速度可以达到 750mm/s;搭载基于锥光偏振全息技术的高精度激光测头,测头测量精度可以达到 1 μm。同时非接触测量模块还配备了基于喷嘴 CAD 模型的专用智能化测量软件,其通过模型可以实现对喷嘴微小复杂曲面非接触测量的自动路径规划,保证非接触测头光束的法线跟随,从而可以实现对喷嘴微槽类特征的快速精密测量,其精度可以达到 5 μm。中航工业精密所研制的小型多轴测量机如图 5 所示。

对于喷嘴的微孔、微锥特征来说,采用基于电感式微小感应测头的接触式测量模块对不同的孔径进行



图5 Agility小型多轴非接触测量机

测量,从而得到内孔孔径、锥角和微孔的其他特征参数。该模块利用微型精密运动结构,通过自适应的柔性铰接头搭载两瓣式微型盲孔测头,其与被测面接触面积小、灵敏度高,能够对喷嘴的内孔特征进行精确测量。

结束语

如今,测量测试技术在制造业中的地位越来越重要,制造过程中的任何一个环节都离不开测量技术的支撑。目前国内测量测试技术落后于高端制造技术的发展需要。

航空产品的复杂性使零部件各具特点,不同的零部件在生产过程中有不同的快速检测需求。例如,飞机的梁、框、肋类零件需要对其轮廓外形、筋条位置与高度、孔位等尺寸进行快速检测;发动机叶片、整体叶盘、飞机蒙皮和整流罩类立体复杂曲面件需要对其型面、边缘位置和尺寸进行快速检测;发动机燃油喷嘴等微小零件需要对微孔、微槽和微锥等进行精密测量;复材壁板需要对其型面、切边等尺寸进行快速检测;任何测量设备和方法都不是万能的,都有其优点和局限性,如何综合利用坐标测量技术解决生产环节中的检测问题是目前航空制造发展的关键和瓶颈。

(责编 一帆)