

现代精密测量技术现状及发展

周亮,王振环,孙东辰,穆乃锋

(海克斯康测量技术(青岛)有限公司 青岛 266100)

摘要:精密测量是先进制造发展的前提和基础,作为智能制造的眼睛,极大地提高了生产效率、降低了生产成本,直接推动了人类社会的发展。在制造信息化大背景下,作为先进制造的先导技术,精密测量方法与仪器技术必须超前或在先进制造基础上提出新的发展趋势,为先进制造精密化、集成化、智能化发展提供信息支撑。概述了工业生产与科学研究中的现代精密测量技术发展现状和研究内容,着重叙述了应用于精密检测的最新技术、精密测量如何从实验室走向生产现场、精密测量技术的未来及发展方向。

关键词:精密测量;智能制造;生产现场;发展方向

中图分类号: TH721 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Present situation and development of modern precision measurement technology

Zhou Liang, Wang Zhenhuan, Sun Dongchen, Mu Naifeng

(Hexagon Manufacturing Intelligence, Qingdao 266100, China)

Abstract: Precision measurement is the precondition and basis of advanced manufacturing development. As the eyes of intelligent manufacturing, precision measurement greatly improves the production efficiency, reduces the production cost, and directly promotes the development of human society. Under the background of manufacturing informationization, as the pilot technology of advanced manufacturing, precision measurement methods and instrumentation technology must be advanced or synchronized with advanced manufacturing, and provide information support for the precision, integration, intelligent development of the advanced manufacturing. This paper summarizes the current situation and research contents of modern precision measurement technology in industrial production and scientific research, emphatically describes the latest technologies applied in precision measurement, how the precision measurement migrates from laboratory to production line, and the future development trend and direction of precision measurement technology.

Keywords: precision measurement; intelligent manufacturing; production site; development direction

0 引言

“没有测量就没有科学。”科学技术是工业信息技术的重要组成部分,是工业信息技术源头^[1]。因此测量技术、控制技术和关键测试设备,是自主、完整掌握发展重大装备的关键^[2]。

在现代工业制造技术和科学研究中,测量仪器已经形成精密化、集成化、智能化的发展趋势^[3]。作为重点发展目标,各国在微/纳米测量技术领域开展了广泛的应用研究^[4]。三坐标测量机是适应上述发展趋势的典型代

表,它几乎可以对生产中的所有三维复杂零件尺寸、形状和相互位置进行高准确度测量^[5]。

随着现代精密制造技术已实现各种测量应用,检测难点也已从规则箱体类工件转变到复杂形状的几何量、自由曲面检测,实现品质要求高、批量大、形状各异的精密三维几何量测量^[6]。

现代精密制造技术和质量控制要求的提高,精密测量设备和过程越来越多地从实验室/计量室走向生产现场,甚至和精密加工生产线/设备完整集成在一起。这个趋势将给精密测量设备和测量应用提出全新的要求,比如如何适应车间现场的复杂环境影响,测量过程如何满

足高速的加工节拍,测量设备如何和产线及加工设备进行自动化及协同连接,测量操作界面如何进行简化和放错设计以适应非计量专业人员的操作要求等^[7]。

随着测量越来越融入到制造过程中,另外一个重要的趋势是精密测量数据在制造过程中的信息化和智能化应用^[8]。在这样的前提下,对精密测量数据要求不再是一份实验室测量报告,而是对制造过程的实时、动态、可视化的跟踪分析,问题预警和处理,以及问题根源分析、措施和闭环等整个质量管理链。

1 精密测量的现状及发展趋势

1.1 硬件架构现状及分析

现代制造过程和精密测量逐渐融合,硬件架构要求也随之增加。结构载体系统设计、传感器单元部件性能和数控驱动及软件分析平台等各部分,共同决定了测量系统的精度指标及应用需求。不同类型的坐标测量系统,根据获取三维尺寸数据的能力和尺寸控制功能及应用场合的不同主要分为实验室型测量系统和现场型测量系统。

实验室型测量系统从结构形式和运动关系角度,主要为移动桥式测量系统和固定式测量系统。如图1所示,移动桥式结构采用活动的桥式框架,可沿固定的工作台运动,结构简单紧凑、开敞性好。工件装载在固定台上不影响测量机运行速度,受地基影响相对较小,适合大多数机加工工件的形位公差检测。但光栅尺和驱动在工作台单侧布置,会引起较大的阿贝误差。随着工业要求的提升,对单项测量精度指标,测量系统综合稳定性的需求也随之显著提升。如扫描速度、采点速率、高速动平衡等对移动部件(桥架)的高刚性和轻量化提出了更高的要求^[9]。



图1 移动桥式测量系统

Fig. 1 A mobile bridge measurement system

如图2所示,固定桥式机结构的桥式框架也是固定不动的,结构刚度强。更适用于高精度,外形更复杂多

变的加工制造趋势。工作台采用预载荷空气轴承,与燕尾导轨系统,保证工作台无摩擦的移动。中心驱动设计减少了偏差与扭转,阿贝臂小。加上其他新技术的融合运用,例如精密光栅、组合温度检测补偿、分布式实时控制系统、互联网远程诊断、完善的安全和碰撞和防护策略等,有效地确保了在复杂多变的条件下,高精度测量任务顺利实现和执行。



图2 固定桥式测量系统

Fig. 2 A fixed bridge measurement system

如图3所示,现场型测量系统主要应用于现场加工车间。随加工精度不断提高,为便于直接检测工件,测量机将直接串联到生产线上。车间型测量机,集成了先进的结构性温度补偿系统、防震系统,并且应用了针对车间现场的加强型设计,特别适合应用在苛刻的车间环境和生产单元环境下。这种测量设备无需气源,且能够与加工设备一同整合在生产线上,确保满足对在线测量的需求^[10]。



图3 现场型测量系统

Fig. 3 An onsite measurement system

1.2 三维精密接触式传感技术

三维精密测头作为探测时发送信号的装置,精度的高低决定了测量结果的准确性与可靠性^[11]。根据微测原理和过零信号的触发机制不同,可分成接触式测头和非接触式测头两种结构^[12]。

接触式测头又分为触发式测头和扫描式测头^[13]。如图4所示,触发式测头原理为探测时产生开关信号,控

制系统对此刻光栅计数器的数据锁存,并将信号传递给软件^[14]。



图 4 触发原理

Fig. 4 The trigger principle

这类测头由于工作原理的限制,在复杂曲面测量中还会产生原理性不定系统误差。在对复杂表面进行触测时,触测起始方向与轮廓接触点法线方向不可避免地存在着一个触测角^[15]。如图 5 所示,触测时,坐标测量机接到测头发出的信号脉冲信号,锁定触球球心坐标值后把球心坐标换算成实际触测点坐标,并按照当前坐标系下最近轴向的方向修正触球半径 r 的影响,如果被测表面不垂直于坐标系的一个轴向,将产生余弦误差^[16]。接触式测头信号预设矢量方向触测,电位数字信号无法进行模拟补偿,因此余弦误差无法避免^[17-18]。

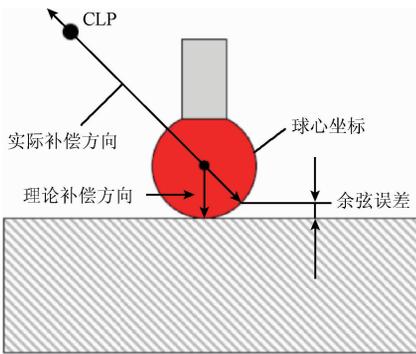


图 5 余弦误差原理

Fig. 5 The cosine error principle

接触式触发测头(见图 6)为常规的箱体类零件测量提供了精确、可靠的数据采集方法^[19]。相应缺点是存在各向异性(三角效应)、预行程、开关行程分散、复位死区等误差,最高精度只能达零点几到一微米,并很难再提升其测量精度和承载能力,因此有一定的局限性^[20]。

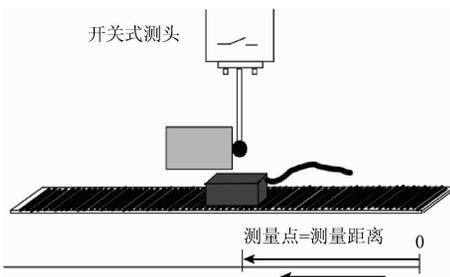


图 6 触发测头

Fig. 6 The trigger probe

扫描测头融合触发和扫描两种工作模式。测量原理是测球在接触被测工件后,测头通过本身 3 个相互垂直的距离传感器,转换输出与测杆微小偏移成正比的信号,感知零件接触程度和矢量方向,通过这些数据作为测量机的控制分量,控制测量机的运动轨迹^[21]。在避免了余弦误差的同时,消除了测头中的机械零位误差^[22]。

若不考虑测杆的变形,扫描式测头(见图 7)是各向同性的,其精度远远高于触发式测头。扫描式测头接触到被测工件后,不仅发出瞄准信号,还给出测端的微位移,即同时具有瞄准和测微的功能^[23]。该类测头的技术关键是能否提供一种无摩擦、无回程误差、灵敏度高、运动直线性好的三维微导轨系统^[24]。测头的工作原理决定了其同时适合已知和未知曲面的扫描测量,大大扩大了其使用范围^[25]。

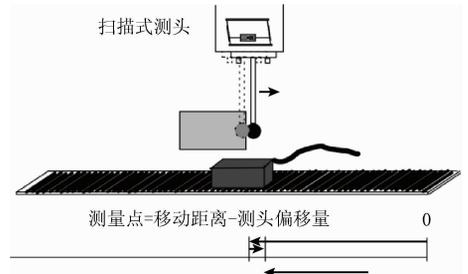


图 7 扫描式测头

Fig. 7 The scanning probe

1.3 三维精密非接触式传感技术

根据工作原理的不同,光学三维测量方法可被分成多个不同的种类,包括摄影测量法、飞行时间法、三角法、投影光栅法等^[26]。这些技术的深度分辨率,覆盖了从大尺度三维形貌测量到微观结构研究的广泛应用和研究领域。在高精密三维检测领域,主要集中在激光干涉(见图 8)、共聚焦原理的应用集成。

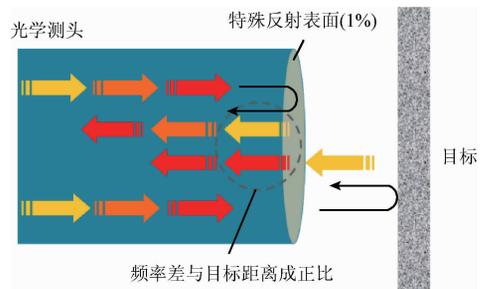


图 8 激光干涉原理

Fig. 8 The laser interference principle

HP-O 作为海克斯康集团研发的高精度干涉法距离传感器(见图 9),通过原始光和低频的调制原始光进行干涉。由于测量测量光工作在红外区间,因此可见的红色激

光,用于瞄准和编程中辅助观察。通过调频干涉式光学测距技术,能够达到亚微米级分辨率,完美测量各类金属材料的漫反射面,为固定式三坐标测量机提供的新型光学扫描技术。



图9 HP-O 激光测头

Fig. 9 The HP-O laser probe

HP-O 光斑直径可以小至 $11\ \mu\text{m}$,分辨率可以达到亚微米级别。相对于接触式和其他光学测量方案,该非接触光学触测系统,对环境光无限制,不仅适合金属材料和复杂特殊表面,与接触式测头相比效率更高。HP-O 不仅可以单点测量也可以连续扫描,相比接触式测量系统拥有更好的系统重复性,采点密度高 ($1\ 000\ \text{pts/s}$),单位时间内实现更均匀更密集的采点。即使扫描速度增加,边缘效应所受影响较小,HP-O 测头与接触测头效率对比如表 1 所示。

表 1 效率对比

Table 1 The efficiency comparison

扫描速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	HP-O	接触测头
10		
20		
30		
40		

高精度 LR 检测系统(见图 10、11),配置超高精度彩色共焦传感器,拥有纳米分辨率。兼容于各种材质与表面,如透明材质、敏感材质、光泽表面、反光表面、涂层等。因为接受角度高达 $90^\circ \pm 40^\circ$,所以玻璃或塑料镜头、棱镜、型材、精密工具都可以进行精密检测。



图10 LR 光学测头

Fig. 10 The LR laser probe

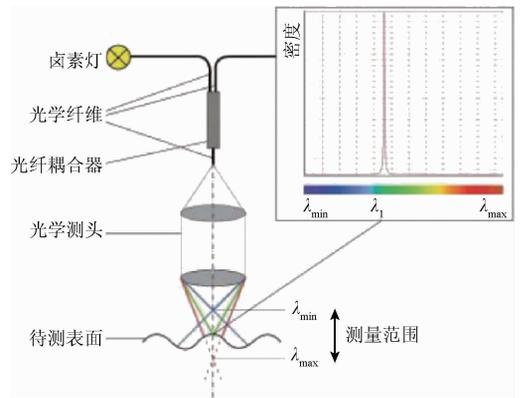


图11 LR 工作原理

Fig. 11 The working principle of LR laser probe

白光通过具有明显色差的光学器件聚焦在测量对象的表面,在此同时反射光达到波长的最大值,光路(激发和发射)在两个位置上聚焦^[27]。反射光的光谱达到波峰,通过该光谱位置计算触测点与触测表面的距离^[28]。

1.3 接触式复杂零部件检测技术

复杂形状的测量,在需要精密的测量系统的同时,对系统软件评价能力提出更高的要求。以整体叶盘为例,整体叶盘的叶片型面是复杂的自由曲面,扭曲度大,加工精度要求高,相邻叶片之间通道深而窄开敞性差。因此造成整体叶盘制造难度大于单叶片,也为其测量增加了难度^[29]。

首先叶轮和叶盘的叶片检测难点在于扭曲的复杂型面,测量过程中数据处理都是按 3D 方向计算半径补偿的,满足这一测量要求,仅仅靠现有相关精度指标只是完成了第 1 步,还要配合高速稳定又精密的四轴扫描才能完美地解决了这个问题^[30]。因此考察扫描探测误差仅仅只能作为一个能力参考,机械结构和数控系统技术下,测量运动中的机器所表现出来的框架动态稳定性和测头动态稳定性,都成为影响这一测量需求所必须要考察的性

能项目。特别是在尖锐的叶片前后缘处,机器必须能够根据叶片曲率变化自动调节扫描速度,自动识别并删除无效点,最优化测量数据的同时保证测量效率,而这些要求无一例外的都超越了现有常见的各项机器精度指标^[31]。

可变高速扫描(variable high speed scanning, VHSS)技术可依据曲面曲率,在已知几何特征上实时连续调整测量速度。VHSS 扫描支持各种复杂外形的高速扫描,扫描过程中自动计算最佳速度、加速度和采点密度,避免测量碰撞和脱离;支持开环扫描和闭环扫描;支持对已定义的理论曲线进行样条插补,从而点数合理(避免点数过多和过少)。机器可以在已知几何量情况下进行持续的调整,实时调整扫描。平直的部位扫描速度快,前尾缘附近区域扫描速度自动降低,实现了检测效率与精度的优化。

在无转台情况下进行叶盘检测时,需采用大量的探针配置并花费较多时间。Leitz 四轴扫描技术,采用先进的控制技术,能够实现四轴联动的连续扫描。可变速扫描检测叶轮的叶型曲面和流道等,测量过程中机器根据曲线的曲率变化调整和优化扫描速度,大大提升了扫描测量的效率。四轴联动保证了一根探针高效完成叶片上的全部检测任务。整个检测方案(见图 12)根据需求定制开发,包括测量过程的优化、定制的计算评价及优化、定制的报告输出。测量的输出满足了制造过程控制和最终质量控制的要求。

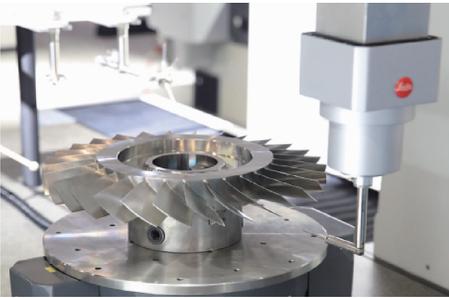


图 12 Leitz 接触式四轴联动叶盘检测方案

Fig. 12 The Leitz contact type four axis leaf disc detection scheme

在以上技术支持下,测量叶盘的时间比其它测量方式节约了近 70% 的时间。在欧洲超过 300 多家知名航空航天和能源行业客户使用这一解决方案测量整体叶盘和叶轮。

1.4 非接触式复杂零部件检测技术

随着激光干涉技术出现,HP-O 解决方案将逐渐成为航空复杂零部件高效率精密测量的最佳方案(见图 13)。HP-O 技术的出现刷新了精密测量的记录,整体叶盘检测效率提升 95%。敏感的零部件要求高精度的非接触测量,避免机械接触的损伤。同时可以定制测量内腔,接触探针是很难达到甚至是无法达到目前,这是是航空发动机

双层盘类工件复杂内腔大尺寸底径测量的唯一解决方案。



图 13 Leitz 非接触式四轴联动叶盘检测方案

Fig. 13 The Leitz non-contact type four axis leaf disc detection scheme

在测量过程中,HP-O 减少了机械探测的局限性,实现高效的数据采集,提供了更快的扫描速度。如检测叶盘的叶尖,直接扫描全部叶片的叶尖,转台匀速旋转即可。在微小特征处,接触测量必须使用足够小直径的探针,以求清晰表达特征详情。小探针的强度较弱易受损,测量过程由此中断。但 HP-O 微小的光斑,远小于接触式探针的直径,能更加准确地获得细小轮廓。由于 HP-O 技术空间分辨率高,因此可以完成最小细节乃至微观尺寸的测量,如倒角和划痕等并以高点密度简便的获得特征信息^[32]。

2 走向现场的精密测量

配置于生产现场的在线检测技术,已经成为众多企业里一种重要的质量管控手段^[33]。智能化生产的鲜明特征之一就是把控产品质量的重点转移到生产过程中的制造质量,以及提高对柔性化生产方式的适应程度。这就决定了测量设备必须作为一种工序检测手段进入车间现场^[34]。

车间现场检测工作站是计量室走向生产现场的代表,作为全合一的测量系统,能够适应车间现场的复杂环境,可与生产单元紧密结合或者是放置在生产现场的任何区域。能够代替所有的专用量规和手工检测仪器,无缝衔接生产线,实现连续监控。

以机械加工及检测自动化方案为例,如图 14 所示,该系统方案集成了三坐标测量机、数控机床、自动化检测管理软件(含设备信息管理和数据信息统计分析系统)、机器人、料库、安全光幕及 RFID 设备等,提供了一个全方位自动化的解决方案。该方案集成 CAM,为机床和测量系统自动化制造和检测一体化提供了解决方案。与此同时,将精密测量从实验室走向生产现场,确保高效、误差闭环补偿、高质量的加工和质量检测,保证产品质量高度一致性和重复性。

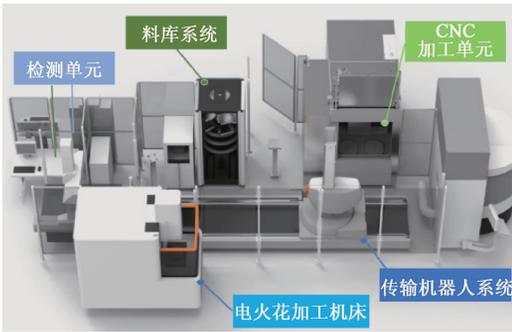


图 14 机械加工及检测自动化方案示意图

Fig. 14 Schematic diagram of machining and measurement automation scheme

智能制造衍生出的自动化集成方案(见图 15),自动上下料工件等自动化检测方案,验证了将精密测量从实验室走向生产现场和加工线的可行性^[35]。传统方式生产和检测状态离散,精密检测效率低下,信息数据处理环节冗杂,信息管理环节所带来的数据繁多和人为操作等不确定因素较多,对快速形成质量改进和监控也带来极大的困扰^[36]。这些车间型自动化检测方案提高了生产效率,减少了工件加工和检测过程辅助工作量,实时反馈设备、工件状态信息,实现快速切换不同工件生产工件的检测结果 SPC 分析或数字化存储^[37]。

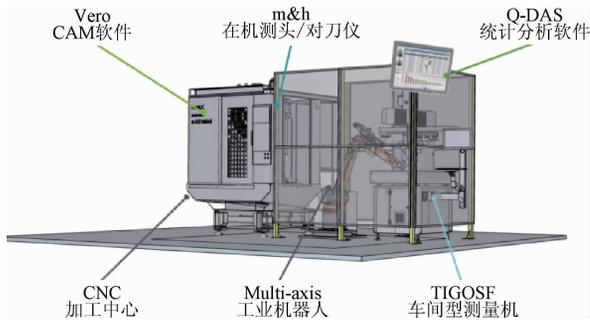


图 15 机械加工及检测自动化方案

Fig. 15 Machining and measurement automation scheme

因此在线测量系统与生产线直接对接集成,将生产环节和检测环节更深更广的紧密融合,是精密测量从实验室走向生产现场和加工线的必然发展趋势,也是智能制造天然的技术要求^[38]。

3 精密测量在制造企业的数据应用

随着信息物理技术和大数据对工业 4.0 的推动,测量数据完全实现数字化、无纸化、海量。质量管控实现测量设备、大数据与质量管控工作流的整合,为企业构建

智慧质量生态系统,为制造安上眼睛,为制造装入智慧,实现现实世界和数字世界信息交互^[39]。

数字化的质量管理平台能够联通质量信息孤岛。企业离散在测量和质控环节中的人员、设备、程序和数据,联通并实现系统的中心化数据库管理、简易的操作工程流、实时透明的数据监控、可视化的信息处理与信息共享^[40]。通过对这些实时采集、监控和管理质量数据相关信息,实现其与质量数据的实时互联。通过平台实现的简化质控操作,能够打破质控孤岛,帮助企业达成质量与制造等部门的协同,为现代化企业高效和科学的质量管理提供了保障^[41]。

数字化的质量管理平台能够实现企业产品生命周期的测量和质量管控,从而帮助企业更好地应对 3 个层次的挑战^[42]:产品制造过程的质量控制,产品设计和制造过程的改进优化,企业业务和运营模式的变革^[43]。从质量策划、测量任务管理、测量任务执行与过程监控,一直到数据处理分析,这些信息被转换成具有实际意义的可操作信息,从跟踪产品设计、制造过程每个环节的质量信息,到应用计量、分析和行动手段,综合分析问题产生的根源,再到反馈和指导设计、制造决策,形成完整的制造闭环,提升了制造业的生产力与品质。

数字化的质量管理平台能够助力制造业打造全方位的智能化、信息化解决方案。如图 16 所示,以海克斯康 SMART Quality 平台为例,SMART Quality 为不同应用特点的需求工厂及企业提供丰富的解决方案,满足不同层次的需求,确保从一个车间、一个工厂,到几个工厂和供应商的高效、透明的测量和质量管控。同时,平台的可扩展能力,与企业其他生产系统进行融合,构建真正的智慧制造企业^[44]。



图 16 智慧制造企业的质量管控

Fig. 16 Quality management and control of intelligent manufacturing enterprise

数字化的质量管理平台从感知和数据采集到依托大数据、云计算等技术,以及互联互通的落地,实现工厂数

据的解析、处理、融合及控制;把信息流转成可操作的指令,通过机器人、智能机床、检测设备等的执行,实现生产工厂的全面自动化与智能化;更深层次的应用是通过生产工厂采集数据的分析、统计和判断,获得洞察,清楚把握机器的性能和运行状况,帮助制造企业连接和优化资产,提高灵活性,提升效率和生产力,以释放所有工业领域的商业价值。

4 精密测量技术的未来及发展

现代精密测量技术涉及广泛的学科领域,作为一门集光学、电子、传感器、制造、自动化集成技术、计算机技术及网络和信息技术为一体的综合性交叉学科,发展将主要集中在理论体系、制造技术、测量技术3个方面^[45]。

从理论体系层面看,随着标准化体制的确立和测量不确定度的数值化,将有效提高测量的可靠性^[46]。理论价值和应用价值的关键问题如下。

- 1) 理论新思维和测量原理的创新研究;
- 2) 测量原理基础理论研究和应用研究;
- 3) 高速坐标测量机误差抑制理论研究;
- 4) 微系统的测量与控制技术,材料特性,微小物理量,微型元件与系统的测试;
- 5) 研制亚微米级的图像测量系统;
- 6) 表面结构分析系统的探索和发展。

制造技术从完善理论维度到结构实现过程的角度,分为硬件、软件、信息化几个方面。

- 1) 硬件:越来越多的通用性、更加便捷的现场化集成和自动化集成技术,柔性化和可移动化^[47]。
- 2) 软件:注重人机交互技术、模块化应用技术、针对复杂形面的测量算法以及开放性的客制化技术。
- 3) 信息化:将大量应用 IIoT 概念和技术进行新设备的开发和既有设备的信息化升级^[48];结合系统化的测量和质量软件,质量大数据引擎为制造管理服务,提升中国精密制造的质量^[49]。

在测量技术方面,测量继续走向更高精度、更高可靠度、环境适应性更宽广、更高速度和更多的传感探测技术^[50]。

- 1) 进一步提高测量分辨率,精度由 μm 级向 nm 级发展;
- 2) 由点测量向面测量过渡,提高整体测量精度即由长度的精密测量扩展至形状的精密测量;
- 3) 随着图像处理等新技术的应用,非接触和遥感技术在精密测量工程中将得到推广和普及。

参考文献

- [1] FANG X, CHEN Z M. The stabilization of a multiplexed optical fiber interferometer system for on-line precision measurement [C]. *Advanced Sensor Technologies and Applications-Proceedings of SPIE 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology*, 2008; 72830D-72830D-5.
- [2] FRENCH P, O' BRIEN B, SHALLOO L. Development and adoption of new technologies to increase the efficiency and sustainability of pasture-based systems [J]. *Animal Production Science*, 2015, 55(7):931.
- [3] 林悦. 仪器仪表与测量控制在当今社会的重要地位[J]. *化学分析计量*, 2010(2):26.
LIN Y. Development of Science and Technology in Instrumentation, Measurement and Control Area of China [J]. *Chemical analysis*, 2010(2):26.
- [4] 黎永前, 朱名銓. 现代精密测量技术现状及发展[J]. *航空制造技术*, 1999(3):13-15.
LI Y Q, ZHU M Q. Status and development of the modern precision measurement technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1999(3):13-15.
- [5] JIANG D, SHAN Y, WANG D, et al. Research on magnetic levitation absolute vibration measurement method in vehicles [J]. *Instrumentation*, 2014(2):38-49.
- [6] 黄永晶, 阮文韬. 现代精度理论在精密测量仪器中的应用[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2011, 28(4):16-20.
HUANG Y J, RUAN W T. Application of modern precision theory precision measurement instruments [J]. *Journal of Chengdu Textile College*, 2011, 28(4):16-20.
- [7] PEARN W L, WU CHIEN-WEI. An effective modern approach for measuring high-tech product manufacturing process quality [J]. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 2005, 22(2):119-133.
- [8] MCGREEVY R J, PANTALEANO M J, FULLER B G, et al. Industrial automation interfaces integrated with enterprise manufacturing intelligence (EMI) systems, US:8010218[P]. 2011-08-30.
- [9] TAO H, GUO S. Improvement and implementation of phase laser range finder [C]. *International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications*, 2015.

- [10] LIU T, JIANG J, YIN J, et al. Swing-style and high signal-to-noise ratio demodulation devices and corresponding demodulation method for the measurement of low coherence interference displacement, US 20140176959 A1[P]. 2014.
- [11] LI L, YIN G F. The Design of high-speed synchronization data collection node machine for multi-chip CCD measurement [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 427-429(9): 702-707.
- [12] 石照耀, 韦志会. 精密测头技术的演变与发展趋势[J]. *工具技术*, 2007, 41(2):3-8.
SHI ZH Y, WEI ZH Y. Evolution and some trends in precision probe technology[J]. *Tool Engineering*, 2007, 41(2):3-8.
- [13] ZHENG F Y, GAO Z H, CHEN Z R. Research on a novel electrical gear-type grating sensor [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2012, 236-237 (11): 1307-1311.
- [14] 王伟丽. 纳米三坐标测量机机械结构及接触式测头技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008.
WANG W L. Research on mechanical structure and contact probe technology of nano - coordinate measuring machine [D]. Hefei : Hefei University of Technology, 2008.
- [15] KIM H S, CHO Y M. Design and modeling of a novel 3-DOF precision micro-stage [J]. *Mechatronics*, 2009, 19(5):598-608.
- [16] 胡洪平. 三维精密线性测头的研制[D]. 北京:北京工业大学, 2014.
HU H P. Development of 3D precision linear probe[D]. Beijing: Beijing Industry University, 2014.
- [17] JANOT S. Method for measuring the trigger to frame time accuracy in measurement receivers: EP, EP 2026480 A1[P]. 2009.
- [18] 何超杰, 高健, 陈新. 基于接触式测头的在线检测关键技术的研究[J]. *机床与液压*, 2008, 36(2): 170-173.
HE CH J, GAO J, CHEN X. Key Technologies of on-line inspection through contact probe[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(2):170-173.
- [19] KRIEG M L, QUINN P A. Apparatus for setting proportional margins based upon the width of a scanned sheet of paper: US, US 4265556 A[P]. 1981.
- [20] 肖贵福. 对发展坐标测量机测头的新思考[J]. *现代测量与实验室管理*, 1995(4):4-9.
XIAO G F. New thoughts on development of coordinate measuring machine [J]. *Modern Measurement and Laboratory Management*, 1995(4):4-9.
- [21] LI H N, ZHOU G D, REN L, et al. Strain transfer coefficient analyses for embedded fiber bragg grating sensors in different host materials [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 135(12):1343-1353.
- [22] VAN DEN B A. Method and device for enlarging the measurement volume of an optical measurement system: EP, US7280226[P]. 2007.
- [23] 胡艳娥, 诸进才. 在机检测触发式测头系统的误差分析与实验[J]. *机电工程技术*, 2015(2):9-13.
HU Y E, ZHU J C. Error analysis and experiment of trigger probe system for on-machine measurement [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2015(2):9-13.
- [24] PETERS A, GROH J, SCHRADER F, et al. Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549(6): 731-740.
- [25] 谭晓丹. 整体叶盘测量特征点提取与数据处理研究[D]. 长春:吉林大学, 2014.
TAN X D. Research on feature point extraction and data processing of integral leaf disc measurement [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [26] HUANG M, HUANG J, FENG Y. High-precision measurement method of time-interval based on pseudo-random sampling [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011:283-291.
- [27] 韩江, 高婷, 江本赤, 等. 非圆齿轮齿廓特性分析及偏差测量方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(10):1520-1533.
HAN J, GAO T, JIANG B CH, et al. Tooth profile characteristics analysis and deviation measurement study of non-circular gear [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(10): 1520-1533.
- [28] LIU H, WANG H, WANG H, et al. A high precision CCD device efficiency calibration device and the evaluation of uncertainty measurement [C]. IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2016:1448-1452.
- [29] 蔺小军, 李宜明, 李政辉, 等. 整体叶盘叶片型面 CMM 测量路径规划技术[J]. *航空制造技术*, 2012, 407(11):50-52.
LIN X J, LI Y M, LI ZH H, et al. CMM Measurement

- path planning technology for blade surface of blisk[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 407(11):50-52.
- [30] CAO Z, DENG J, WU Q. Scheduling for complex manufacturing processes based on multi-agent system[C]. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 2011:726-730.
- [31] 孟书广. 航空发动机复杂零部件的新型测量技术[J]. *航空制造技术*, 2014, 4(13):32-35.
- MENG SH G. New metrology technique for complex components of aero-engine [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 4(13):32-35.
- [32] WANG J, GAO B, ZHANG X, et al. Error correction for high-precision measurement of cylindrical objects diameter based on machine vision [C]. *IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2016:1113-1117.
- [33] 朱正德. 企业推行智能化制造对现代测量技术发展的影响 [C]. 2015 中国汽车工程学会年会论文集 (卷3), 2015.
- ZHU ZH D. The influence of enterprise 's intelligent manufacturing on the development of modern measurement technology [C]. *2015 China Automotive Engineering Society Annual Conference Proceedings (Volume3)*, 2015:1229-1233.
- [34] 朱正德, 刘攀. 适应汽车柔性化生产方式的检测技术[J]. *汽车工艺师*, 2017(4):27-28.
- ZHU ZH D, LIU P. Detection technology of flexible production mode for automobile [J]. *Modern Components*, 2017(4):27-28.
- [35] VADON H, LATRY C. Method for processing images using automatic georeferencing of images derived from a pair of images captured in the same focal plane; US, EP 1828992 B1[P]. 2011.
- [36] KANE J P, RE V, HOLMES D, et al. Generating a representation of the status of a data processing system based on empirical operations metrics and derived sentiment metrics; US20150271036[P]. 2015.
- [37] VRBA I, PALENCAR R, HADZISTEVIC M, et al. Different approaches in uncertainty evaluation for measurement of complex surfaces using coordinate measuring machine [J]. *Measurement Science Review*, 2015, 15(3): 111-118.
- [38] 韦余雷. 数字化检测系统在生产线上的应用[J]. *航空制造技术*, 2015, 476(7):53-55.
- WEI Y L. Application of digital inspection system in production line [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 476(7):53-55.
- [39] QIU H, LIN C J. Measurement errors of coordinate measuring machine produced by touch trigger probe system[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 718-720(7):756-761.
- [40] GU W, WANG D, WANG Y. A novel adaptive manufacturing system based on artificial intelligence approach [C]. *Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, IEEE*, 2016:1056-1059.
- [41] DUNAS E, ROGHI P. System and method for real-time interconnection of elements of a wide area monitoring, measurement or data collection system through a direct digital satellite broadcasting multiplexing system; EP, US 8971236 B2[P]. 2015.
- [42] 荆宁宁. 企业产品生命周期中的质量管理[J]. *轻工标准与质量*, 2001(2):26-29.
- JING N N. Quality management in enterprise product life cycle [J]. *Standard and Quality of Light Industry*, 2001(2):26-29.
- [43] GORGOI M. Methods & algorithms in manufacturing and assembly industry scheduling for flexible manufacturing system [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 664(2):1098-1106.
- [44] LEE J, BAGHERI B. Trends of big data analytics and cyber-physical systems in industrial 4.0 systems[C]. *5th International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics*, 2014:.
- [45] ZHENG D, XIAO Z, XIANG X. Multiple measurement models of articulated arm coordinate measuring machines[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(5):994-998.
- [46] 费业泰, 赵静, 王宏涛, 等. 三坐标测量机动态误差研究分析[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(增刊1):773-776.
- FEI Y T, ZHAO J, WANG H T, et al. A review of research on dynamic errors of coordinate measuring machines[J]. *Chinese Journal Of Scientific Instrument*, 2004, 25(Suppl. 1): 773-776.
- [47] HOFFMANN M, SCHWARTENGRABER R, WESSOLEK G, et al. Comparison of simple rain gauge measurements with precision lysimeter data [J]. *Atmospheric Research*, 2016, s174-175(6):120-123.
- [48] LU H, HU L, LIU G, et al. Cognitive model-based evolution mechanism of the information status in internet

of things [J]. Information Technology Journal, 2014, doi:10.3923/itj.2014.2431.2436.

- [49] XU D, CUI Y, LI H, et al. On the future of Chinese cement industry [J]. Cement & Concrete Research, 2015, 78(12):2-13.
- [50] COMPTON R P, HEDLUND J. Reducing impaired-driving recidivism using advanced vehicle-based alcohol detection systems: A report to congress [R]. Dot Hs, 2007:1-18.

作者简介



周亮, 1997 年于东南大学获得学士学位, 分别在 2000 年和 2004 年于比利时鲁汶大学获得硕士学位和博士学位, 现为海克斯康制造智能大中华区执行总裁, 主要研究方向为精密测量和精密机械。

E-mail: liang.zhou@hexagon.com

Zhou Liang received his B. Sc. degree from Southeast University in 1997, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both

from University of Leuven, Belgium in 2000 and 2004, respectively. Now, he is the executive CEO of greater China region, Hexagon Manufacturing Intelligence. His main research interest is precision measurement and precision machinery.



王振环, 1992 年毕业于中国计量大学长度计量专业, 现为海克斯康测量技术(青岛)有限公司精密测量事业部总经理、中国工程学会测试技术专业委员会副主任委员、中国计量大学兼职教授, 主要研究方向为高精度测量和复杂零部件检测。

E-mail: zhenhuan.wang@hexagon.com

Wang Zhenhuan graduated from China Jiliang University in 1992. Now, he is the general manager of Precision Measurement Division, Hexagon Measurement Technology (Qingdao) Co. Ltd., a vice chairman of the Test Technology Professional Committee, China Engineering Society, and a part time professor in China Jiliang University. His main research interest includes high-precision measurement and complex part measurement.