

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.03

几何量数字化测量方法与装备的现状与发展趋势

何学军

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 几何量数字化测量方法与测量装备的发展对制造业影响深远, 随着测量任务的多样化与复杂化, 对几何量数字化测量方法与测量装备的要求越来越高。本文以现有的典型测量系统为例, 根据传感单元工作原理的不同对这些测量系统进行了分类, 分别介绍了激光跟踪仪、激光雷达、激光跟踪干涉仪、移动空间坐标测量系统、室内 GPS、数字摄影测量系统的数学模型、工作原理、主要参数, 并介绍了各测量系统的主要代表性产品、应用领域和目前的局限性。以此为基础, 结合测量装备的自动化、数字化和智能化发展现状和当前现场环境下的复杂测量任务需求, 提出了测量参量由单一参数测量向多参数测量发展、测量对象由单点测量向点云测量发展、测量方式由静态测量向动态测量发展、测量方案由单测量系统独立完成向多测量系统协同解决方向发展四项发展趋势, 并顺应发展趋势提出相应的解决方案, 为制造业领域中几何量数字化测量方法与测量装备的选择提供参考。

关键词: 测量与测量装备; 数字化; 智能化; 统一测量方案

中图分类号: TB921

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0035-06

Present Situation and Development Trend of Geometric Digital Measurement Method and Measuring Equipment

HE Xuejun

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Geometric digital measuring method has had a profound impact on the development of measuring equipment for manufacturing. As the measurement task becomes diversified and complicated, the requirements for digital measuring method and measuring equipment for geometric quantities are getting higher and higher. Taking the existing typical measurement system as an example, the measuring systems are classified based on the working principle of the sensor unit. The mathematical model, working principle and main parameters of the laser tracker, laser radar, laser tracking interferometer, mobile space coordinate measuring system, GPS and digital photogrammetry system are introduced respectively, and the main representative products, application fields and current limitations of each measurement system are introduced. Combining with the current situation to develop the automatic, digital and intelligent measuring equipment and the current complex task requirements of on-site measurement environment, this paper proposed four development trends, including the development of measurement parameter from a single parameter measurement to the multi-parameter measurement, the development of measurement object from the single point measurement to the point cloud measurement, the development of measurement way from static measurement to dynamic measurement and the development of measurement scheme from completing independently by a single measurement system to solving collaboratively by multiple measurement systems, and put forward the corresponding reference solution. It provides reference for the selection of geometric digital measurement methods and measuring equipment.

Key words: measurement method and measurement system; digital; intelligent; measurement scheme

0 引言

“中国制造 2025”发展战略对高端装备制造业的质量提出了很高要求。为提高产品质量, 除了提升材料性能和加工手段外, 还需要提升产品的测量能力^[1-2]。随着数字化、智能化、自动化测量技术与测量装备的发展, 出现了更多的精密测量手段以满足高端装备产品全生命周期的质量评价需求。目前, 越来越多的几何量数字化测量系统已作为产品检测的重要环节融入

高端装备制造生产线, 并已成为大型装备制造业中质量保证的重要手段及不可或缺的部分^[3-5]。随着测量任务和测量需求日益复杂化, 几何量测量设备和装备在制造业中的地位越来越关键, 越来越多的新型几何量测量系统被逐步应用于大型装备制造业中, 以解决不同的质量检测 and 过程控制问题^[6-7]。为了满足制造业特别是大型装备制造业对几何量数字化测量方法与装备的迫切需求, 本文对目前主要的几何量测量系统的性能及技术指标进行分析, 举例阐述其应用特点,

在此基础上总结几何量测量方法及装备的发展趋势,并提出相应的解决方案。

1 几何量测量系统发展现状

各类几何量测量系统发展至今,大都实现了数据采集的数字化、数据分析及处理的智能化,并均具备与外部设备连接的通信接口和数据模块,作为一个不可或缺的部分融入到产品的全生命周期和全溯源链中^[8-9]。本文按照测量系统传感单元的不同,将几何量数字化测量系统分为基于距离与角度融合的测量系统、基于距离交汇原理的测量系统、基于角度交汇原理的测量系统三大类,下面分别进行介绍。

1.1 基于距离与角度融合的数字化测量系统

基于距离与角度融合的数字化测量系统的工作原理为:以一个距离值和两个角度值作为观测量,构建球坐标系,从而实现空间中的点位坐标测量。这类设备的典型代表包括激光跟踪仪、激光雷达等。

1.1.1 激光跟踪仪

目前,国外的激光跟踪仪以 Leica, API 和 Faro 三家公司的产品为主,其中,Leica 研制的激光跟踪仪产品在国内占据最大市场。国内的激光跟踪仪中,中图公司研制的激光跟踪仪原理样机最具代表性,但是其性能和实际应用效果与国外成熟产品尚存在一定差距。激光跟踪仪具有测量范围大、工作效率高、测量精度高、可支持软件系统二次开发、能够进行动态测量等优点,已广泛应用于飞机、航天器等大型装备的部件尺寸检测及大型紧缩场测量中。Leica 研制的 ATS600 型激光跟踪仪最大极限测量速度可达 3000 点/秒,能够完成运动目标的监测,最大跟踪速度可达 6 m/s;其静态测量指标为:空间点坐标测量不确定度可达 $(15 + 6L) \mu\text{m}$,可通过软件直接对被测工件的形位误差和尺寸误差进行评价和分析,满足不同测量任务的需求^[10]。利用激光跟踪仪进行飞机关键部件尺寸公差检测的工作现场图如图 1 所示。

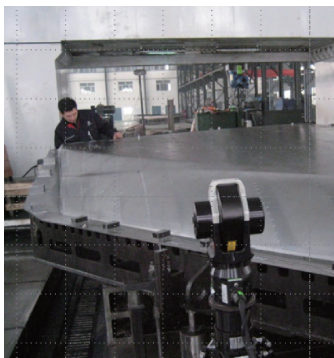


图 1 利用激光跟踪仪进行飞机关键部件尺寸公差检测

1.1.2 激光雷达

激光雷达是一种面向大空间的扫描类测量系统,可以高效率地对被测物体表面进行非接触直接扫描测量,形成面向特征的点云数据。目前国外的激光雷达以尼康公司的产品为主,国内的激光雷达中,航天 102 所研制的相应样机最具代表性。激光雷达可对金属、复合材料等多种表面进行轮廓测量,具有很好的适应性(可适应高亮反射、漫反射和各种精细表面),目前已广泛应用于航空整机及部件测量、航天卫星外形轮廓测量等领域。尼康公司生产的 MV350 型激光雷达的主要技术指标为:最大测量距离可达 50 m,采用工具光球法测量时,单点点位测量不确定度为 $10 \mu\text{m}/\text{m}$,最大扫描速率 4000 点/秒,俯仰角测量范围为 $\pm 45^\circ$,水平角测量范围为 360° 。激光雷达的突出优势在于它的扫描特性,它可以根据产品模型进行扫描路径规划,实现自动扫描,极大地提高了扫描效率,因此在飞机、航天器、船舶、天线等大型曲面轮廓测量领域具有广阔的应用前景。国外应用激光雷达对波音 787 飞机进行轮廓测量的工作现场图如图 2 所示。



图 2 应用激光雷达进行波音 787 飞机轮廓测量

1.2 基于距离交汇原理的数字化测量系统

距离约束测量法是以单一测距单元作为测量节点,以距离值作为观测量实现坐标测量的方法,其主要代表性仪器是激光跟踪干涉仪测量系统。针对移动空间坐标的测量可采用超声测距法,其原理与距离约束测量法相似,但精度较低^[11]。

1.2.1 激光跟踪干涉仪测量系统

目前大尺寸测距方法中应用最广泛的是激光测距法^[12]。徕卡的 u-base 激光测距模块在 100 m 范围内的测量误差不高于 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。国内多家研究机构依据多边测量原理构建了坐标测量方法,但是最终的成熟商业产品只有 etalon(目前已被海克斯康收购)研制的 LaserTracer 系统,其标称测距精度可达 $0.2 \mu\text{m} + 0.3 \mu\text{m}/\text{m}$,并已研制出多个升级系列型号。激光跟踪干涉

仪测量系统由至少 4 个激光干涉仪基站、广角测量目标、控制器、环境气象站、中心计算机组成。激光干涉仪基站具备高精度二维转台结构,能够保证较高的定型精度,因此可实现多台基站对同一目标的定位测量,并能够保证构建的多边约束算法的精度。激光干涉仪可应用于大型基准控制网及多轴加工设备的校准,也可用于对数控机床进行多自由度校准。激光跟踪干涉仪测量系统如图 3 所示。



图 3 激光跟踪干涉仪测量系统

1.2.2 移动空间坐标测量系统

移动空间坐标测量系统 (Mobile Spatial coordinate Measuring System, MScMS) 由都灵理工大学工业计量与质量实验室研制,该系统主要包括超声发射基站、手持探针与 PC 计算机。超声基站布设在工作空间内组网测量网络,手持探针包含两个超声接收器,用以接收基站信号,利用超声测距原理观测每个基站的超声发射器与探针上超声接收器之间的距离,在至少获得四个基站的距离观测测量后,可解算手持探针的尖端三维坐标值。所有超声基站通过蓝牙将数据传输至 PC 计算机进行解算。MScMS 的优势在于便携性好、可扩展性强、成本低,缺点是测量精度较低。

1.3 基于角度交汇原理的数字化测量系统

角度交汇原理是指:在空间内至少有两个点的位置已知,待求点到两个已知点的水平角度和垂直角度均可测量得到,根据多个角度交汇关系即可计算得出待求点的空间坐标。采用这种原理的典型仪器包括摄影测量系统、室内 GPS 等。

1.3.1 室内 GPS

室内 GPS 是一种基于光电定位的大空间、多站位测量系统,由基站、接收器、前端处理器、中心计算机和标准尺等部分组成。基站可发射两束旋转激光信号,同时每隔固定周期发射锥度激光信号,接收器完成三组激光信号的采集,之后通过前端处理器完成接收器到发射站的空间水平角和垂直角的解算,当接收器接收到至少两个基站信号后,即可通过前端处理器

的无线通信模块将计算得出的空间角度发送给中心计算机,中心计算机通过角度交汇原理完成空间坐标解算^[13]。同时中心计算机上的测量软件还可完成复杂测量任务规划、测量数据分析等任务。室内 GPS 的优势在于可以通过增加测量基站的数量扩展测量量程,且测量精度不受太大影响。目前,国外的室内 GPS 主要有 Nikon 生产的 iSpace 系列产品,国内的室内 GPS 主要有天津大学自主研发的 wMPS 型产品,且已应用于多个主机场所。目前,室内 GPS 主要用于大部件对接过程监控、智能制造过程全局空间测量网的构建等,其全空间测量误差不高于 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。室内 GPS 结构示意图如图 4 所示,发射站在工作空间内发射激光信号,接收器接收不同发射站的信号后将信号传输至中心计算机,中心计算机对信号进行解析,计算得出空间位置,从而完成点位坐标测量。图 5 为室内 GPS 应用于飞机总装现场的布置图。

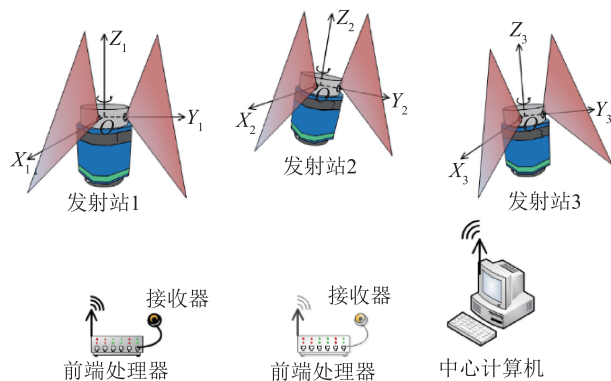


图 4 室内 GPS 结构示意图

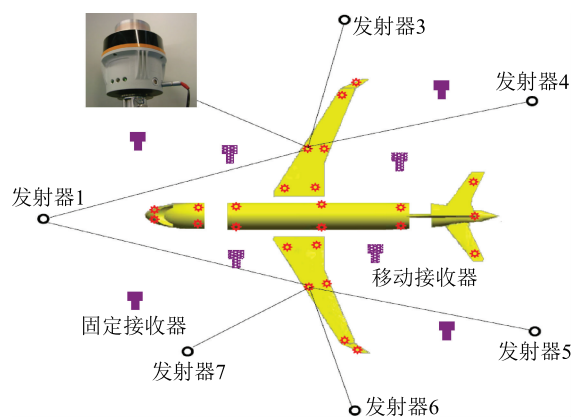


图 5 室内 GPS 应用于飞机总装现场布置图

1.3.2 数字摄影测量系统

数字摄影测量系统通过数字相机拍摄照片,利用图像处理手段获取目标的几何特征等参数,属于近景摄影测量技术范畴,已广泛应用于飞机、航天器的磨具、型面测量等领域。数字摄影测量过程示意图如图 6

所示,首先利用数字摄影技术将三维场景转换为二维图像,然后通过一系列的图像处理算法将二维图像还原为三维场景,之后提取感兴趣的关键特征从而完成测量过程。数字摄影测量系统可分为采用单相机移动多站位的单相机测量系统和采用多组相机固定式的在线测量系统。单相机测量系统的测量对象主要为静止

目标,在多个位置对被测目标进行测量,通过编码点确定共同基准,经图像处理获得最终测量结果。多相机测量系统采用空间组网的形式(可采用基准尺或基准场组网),以多个相机的空间位置作为外参数,解算空间标志点位坐标。多相机测量系统通过多相机的硬触发保证图像的实时性,可针对运动目标进行动态测量。

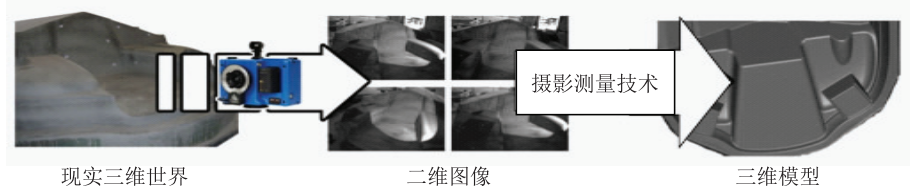


图6 数字摄影测量过程示意图

目前,国外 GSI, AICON 3D, GOM 等公司均研制了数字摄影测量系统,国内辰为、天远等公司也研发出了类似的产品。目前,数字摄影测量技术正向着高速摄影测量的方向发展,系统的效率、动态性能和精度将达到更高水平。高速摄影测量系统可应用于点火、爆炸、动态形变等瞬态过程的图像监控领域,例如 NDI 公司研制的 Optotrak Certus 摄影测量系统(如图 7 所示)目前已广泛应于汽车运动测量、飞机大型结构件动态强度变形量测量等领域,该系统测量速率能够达到 500 帧率,最多支持 512 个标识点同时测量,具备很高的测量效率,系统误差不高于 $\pm 0.1 \text{ mm}$,分辨力为 0.01 mm 。



图7 NDI 公司的 Optotrak Certus 光学测量系统

2 几何量测量方法与装备发展趋势

随着数字化、智能化和网络信息化等技术的发展,在大数据分析 & 处理技术的推动下,目前几何量测量系统及测量装备均向着面向对象、面向任务的方向发展,并在工业制造产品的全生命周期中发挥着越来越重要的作用。随着制造业的发展,对几何量测量装备的测量精度、测量效率、测量稳定性和现场适应性等指标要求越来越高。下面对几何量测量技术与测量装备的发展趋势进行总结。

2.1 测量参量由单一参数测量向多参数测量发展

最早的几何量测量设备往往是针对单一参数进行测量的,例如:只测量角度的经纬仪、只测量距离的激光干涉仪等设备,但是随着测量任务的多样化,仅针对单一参数进行测量往往难以满足评价需求,需要开展多参数测量以满足更加复杂的质量评价要求。例如:在机车的转向架测量中,过去主要关心轮对之间的位移,只需测量单一的尺寸就可以满足设计要求^[14-15]。随着设计和工艺的发展,更多的参数需要被关注,仅测量单一尺寸难以满足质量评价要求,需要进行 6D 参数测量^[16]。因此,需要设计相应的自动化测量系统,采用非接触测量手段配合自动化引导装置,完成多个参数的整体测量,并配合软件控制系统,将生产线测量系统嵌入整个机车生产控制管理系统,完成统一的测量、展示、管理和规划。高铁机车转向架多参数自动化测量系统如图 8 所示,该系统由激光位移传感组件、高铁转向架、铝型材导轨、纵梁、测量龙门架、纵梁支柱、设备整体地基、支撑柱调整机构与转向架定位支撑柱装置等组成。该测量系统应用于高铁转向架自动化装配生产线,能够自动测量转向架轴距、对角线、基准块与轮对内侧等尺寸,是测量参量由单一参数测量向多参数测量发展的重要体现。

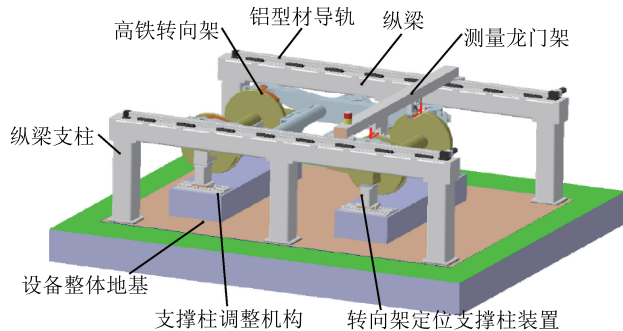


图8 高铁机车转向架多参数自动化测量系统

2.2 测量对象由单点测量向点云测量发展

随着测量装备的发展,对复杂零部件的几何尺寸有了更好的测量保证和溯源手段,同时对大型零部件几何轮廓的检查由轮廓上的多点位置测量,逐步发展为某特定截面上轮廓线的测量,直至现在的整个轮廓面测量^[9],在此过程中很多关键部件的测量也由单点测量向点云测量的方向发展^[17],例如:在航空制造领域中,整流罩为复杂的二次、三次曲面,机翼为小曲率变化的流线型结构,发动机叶片为扭转的曲面结构,这些型面均需要进行点云测量以确定其质量符合要求;在新能源领域中,对大型风力发电机叶片成型磨具进行周期性几何轮廓测量以及对定型后的叶片进行抽样外形轮廓检测时均需要进行点云测量;航天领域中,卫星天线和用于测量目标散射特性的紧缩场均需要进行点云测量以确定其质量符合要求,等等。

目前,实现产品几何轮廓点云测量最有效的手段是以激光扫描仪为主体的三维扫描测量,通过获取海量的反映产品几何形貌特征的三维点云数据实现对产品几何轮廓特征的描述。但如何判定所使用的扫描设备是否与给定的技术指标相符、如何确定扫描测量数据的有效性、如何对三维扫描测量结果进行评价、如何确定扫描结果的一致性等问题,一直是三维扫描测量手段无法回避的技术难题,这些问题的存在直接影响测量结果的可靠性,目前多家研究院所和高校正在对这些问题进行重点研究,探索解决方法。

2.3 测量方式由静态测量向动态测量发展

在大型装备制造过程中,产品的尺寸公差和型面公差等参数往往是仪器在静态过程中完成测量的。但是,随着智能制造的发展,要求对产品制造过程进行实时在线监控,这就要求针对运动目标进行高精度的动态测量^[18-20]。例如:在航天器和卫星等大型部件对接过程中,不仅要求在对接最终位置进行精确测量,也需要对这一过程中的大部件位置和姿态进行跟踪测量,以完成全过程的精准把控;在大型发射天线的型面测量中,要求对整个型面进行快速测量,这就要求对各个需要拼接的单块面板的形貌和姿态进行动态测量,以保证拼接过程的可控;在智能制造领域,需要对工业机器人末端夹持姿态和自动引导车运动姿态进行实时动态监控,以保证智能制造过程的准确可控。因此,需要构建由具备针对运动目标测量能力的测量系统组成的动态测量网络,完成针对运动目标的动态测量过程的监控和评价,且需要解决这类系统针对运动目标的测量能力评价问题。

以大尺寸类的数字化测量系统的动态性能研究为

例,国外巴斯大学以工业机器人作为被测对象,验证了室内GPS的动态测量性能,国内航空工业计量所开展了激光跟踪仪和摄影测量系统的动态参数评价研究,研制了圆轨迹与直线轨迹标准装置,形成了相应的研究方法。但是目前的大尺寸坐标仪器的计量检定规范中,很少提及动态测量能力和性能的检定要求,仅在JJF 1242《激光跟踪仪校准规范利用圆轨迹发生器》中提出了激光跟踪仪的极限跟踪速度等几个与动态性能相关的参数定义,并未规范校准方法^[21]。鉴于大尺寸测量设备针对运动目标的动态测量能力评价相对落后的现状,需要从以下几点展开研究:在定义大尺寸测量设备的动态特性参数的基础上,构建动态定位误差模型,研究动态误差的补偿方法,形成校准规范和校准方法。

2.4 测量方案由单测量系统独立完成向多测量系统协同解决方向发展

新型的数字化测量系统具备测量精度高、测量速度快、自动化程度高的优势,已经为大型装备制造过程中的产品质量保证做出了极大贡献。但是随着制造过程的复杂化、测量需求的多样化,这些单一测量系统组成的测量方案往往难以解决复杂的现场测量问题,在这样的大背景下,采用多个测量系统进行数据融合,发挥多种测量系统的优势,协同完成同一复杂测量任务,将测量数据统一在产品制造坐标系下,从而完成产品的质量评定,已经成为一种重要发展趋势^[21-23]。

例如,飞机装配时将各个零件和组件按照产品技术要求进行定位和连接的过程中,由于零部件数量多、工艺复杂,且大型结构件刚性差、易变形,导致装配精度难以保证,为解决这一问题,利用多个测量系统协同组合完成同一复杂测量任务已经成为一种重要手段。首先分析影响装配的关键特征因素,并针对这些因素选择不同的测量设备(例如高精度单一点位测量可采用激光跟踪仪,高效的姿态参数跟踪可选择室内GPS或摄影测量,大量的型面点云数据采集可选择激光扫描仪等),从而规划统一的测量方案,之后对此测量方案进行精度仿真分析,以飞机部件模型为引导,构建基于模型的数字化多系统测量平台,利用数据融合手段建立统一的测量基准,并与装配基准匹配,从而综合发挥多个测量系统的优势,完成复杂测量任务。这种新型的测量方案需要解决多个测量系统的基准数据融合、单一测量系统的现场精度核查、基于匹配模型的误差分配等问题。

3 结论

几何量数字化测量方法与测量装备在工业制造特

别是大型装备制造领域中发挥着越来越重要的作用,测量任务的多样化和复杂化也对几何量数字化测量与测量装备的发展提出了更高要求。本文以“中国制造 2025”发展战略需求为背景,系统梳理目前主要的几何量数字化测量系统,并介绍各系统的主要代表厂家及产品、应用特点和自身局限性。以此为基础,结合测量装备的自动化、数字化和智能化发展现状和当前现场环境下的复杂测量任务需求,提出四项发展趋势,并顺应发展趋势提出相应的参考解决方案,为几何量数字化测量方法与测量装备的发展起到推动作用。除了这四项发展趋势外,几何量数字化测量方法与装备应与工业机器人或自动引导智能小车等装备结合,形成测量、控制一体化的解决方案,但同时也面临相应的测量方法规划与校准问题,这类问题将成为今后研究的热点,也为几何量数字化测量带来了挑战。

参 考 文 献

- [1] 叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. 计量学报, 2008, 29(z1): 1-6.
- [2] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [3] Zhao Z Y, Zhu J G, Xue B, et al. Optimization for calibration of large-scale optical measurement positioning system by using spherical constraint [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2014, 31(7): 1427-1435.
- [4] Zhao Z, Zhi Z, Ma L, et al. Research on an optoelectronic measurement system of dynamic envelope measurement for China Railway high-speed train[C]// Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2018.
- [5] 杨角龙, 黄翔, 李泷杲, 等. 基于扫描线点云的飞机蒙皮修配量提取方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 73-77.
- [6] 周斌斌, 马骊群, 赵子越. 目标引导系统模型研究[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 59-64.
- [7] 李洋, 曹铁泽, 瞿剑苏. 一种天线转向精度标定方法[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(4): 87-91.
- [8] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 数字化大尺寸测量系统的应用发展及若干问题综述[J]. 测控技术, 2018, 37(z1): 200-203.
- [9] 李洋, 曹铁泽, 瞿剑苏. 基于三维坐标的转台定位精度标定方法[J]. 计测技术, 2020, 40(2): 14-19.
- [10] 陈丽丽, 尹华彬, 刘胜兰, 等. 航空实物制造依据三维数字化测量及模型重建[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 24-29.
- [11] 刘红光, 路瑞军, 崔尧尧, 等. 基于激光干涉技术的大尺寸绝对测量方法的研究[J]. 测控技术, 2018, 37(1): 107-109.
- [12] 何学军, 张志权. 接触式干涉仪技术改造[J]. 计测技术, 2009, 29(4): 53-54.
- [13] 赵子越, 郝继贵, 杨凌辉. 采用精确三维控制场的 wMPS 全局组网定向方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 151-156.
- [14] 马骊群, 王立鼎, 靳书元, 等. 工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2006, 26(6): 1-5.
- [15] 孙安斌, 马骊群, 高廷, 等. 高铁转向架在线自动测量系统的研制[J]. 制造业自动化, 2018, 40(12): 7-10, 20.
- [16] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 基于视觉原理的高精度 6D 传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(7): 92-94, 97.
- [17] 何学军. 大型结构件数控加工在位计量检测技术研究[J]. 计测技术, 2019, 39(3): 51-54.
- [18] 甘晓川, 赵子越, 马骊群. 大尺寸测量系统运动目标测量能力校准现状[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 36-41.
- [19] 甘晓川, 邹志, 马骊群. 动态包络线非接触测量系统研究[J]. 计量学报, 2018, 39(z1): 22-27.
- [20] 凌燕通, 马骊群, 李洋, 等. 一种基于速度三角波的转台动态响应性能的评价方法[J]. 计测技术, 2018, 38(5): 65-68.
- [21] 费业泰, 卢荣胜. 动态测量误差修正原理与技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.
- [22] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 一种基于多传感系统协同测量的联合平差组网方法[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 104-109.
- [23] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 激光跟踪仪与室内 GPS 的协同测量组网方法[J]. 测控技术, 2019(7): 79-83.

收稿日期: 2021-02-02; 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目(MJ-2017-J-83); 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2019205A001)

作者简介



何学军(1977-),男,高级工程师,航空工业计量所长度研究室主任,国家计量标准一级考评员,全国光伏专用计量器具计量技术委员会委员。主要从事几何量计量测试技术及仪器研究,主持完成了大型结构件数控加工在位计量检测技术、锥度校准技术等研究项目,从业二十年以来,参加几十项科研项目,主持起草 2 部行业规范,参与编写教材 1 部。