

机电工程复杂设备装配精度保障的数字化测量技术应用

李秋林

江西亿晟电气有限责任公司 江西南昌 330000

摘要：本文聚焦于机电工程复杂设备装配精度保障问题，深入探讨数字化测量技术在其中的应用。首先阐述了机电工程复杂设备装配精度保障的重要性和面临的挑战，接着详细介绍了常见的数字化测量技术，包括激光跟踪测量技术、机器视觉测量技术等。通过实际案例分析了数字化测量技术在提高装配精度、提升装配效率等方面的应用效果。最后对数字化测量技术在机电工程复杂设备装配中的发展趋势进行了展望，旨在为相关领域的研究和实践提供参考。

关键词：机电工程；复杂设备装配；精度保障；数字化测量技术

引言

在现代制造业中，机电工程复杂设备的应用日益广泛，如航空航天设备、大型机床、高端医疗设备等。这些设备的性能和可靠性在很大程度上取决于装配精度。装配精度不仅影响设备的正常运行，还关系到产品的质量和使用寿命。随着科技的不断进步，对机电工程复杂设备装配精度的要求也越来越高。传统的测量方法在精度、效率和自动化程度等方面已经难以满足现代装配的需求，数字化测量技术应运而生。

本研究旨在探讨数字化测量技术在机电工程复杂设备装配精度保障中的应用，分析其优势和应用效果，为提高机电工程复杂设备的装配质量和效率提供理论支持和实践指导。通过应用数字化测量技术，可以实现对装配过程的实时监测和精确控制，减少人为因素的影响，提高装配精度和一致性，降低生产成本，增强企业的市场竞争力。

一、机电工程复杂设备装配精度保障的重要性和挑战

（一）重要性

设备性能方面：高精度的装配能够确保设备各部件之间的配合精度，使设备在运行过程中保持稳定的性能。例如，航空发动机的装配精度直接影响其推力、燃油消耗率和可靠性等关键性能指标^[1]。

产品质量方面：装配精度是保证产品质量的关键环节。精确的装配可以减少设备运行过程中的振动、噪声和磨损，延长产品的使用寿命，提高产品的市场认可度。

生产效率方面：合理的装配精度可以减少装配过程中的调整和返工次数，提高装配效率，缩短生产周期，

降低生产成本。

（二）挑战

零部件制造误差：机电工程复杂设备通常由大量的零部件组成，每个零部件在制造过程中都可能存在一定的误差。这些误差的累积会对装配精度产生较大的影响。

装配过程中的变形：在装配过程中，由于零部件的自重、夹紧力、焊接应力等因素的作用，可能会导致零部件发生变形，从而影响装配精度。

人为因素的影响：传统的装配方式往往依赖工人的经验和技能，人为因素的不确定性较大，容易导致装配精度的波动。

装配环境的影响：装配环境的温度、湿度、振动等因素也会对装配精度产生一定的影响。例如，温度变化会引起零部件的热胀冷缩，导致尺寸精度的变化。

二、常见的数字化测量技术及其应用分析

（一）激光跟踪测量技术

原理详解：激光跟踪测量系统主要由三大部分构成：高精度的激光跟踪仪、特制的反射靶标以及数据处理计算机系统。该系统的工作原理是激光跟踪仪持续发射稳定的激光束，通过光学反射原理实时跟踪靶标的空间位置变化，精确测量靶标在三维空间中的坐标值。在实际测量过程中，操作人员可以灵活移动靶标位置，系统能够快速采集物体表面大量特征点的空间坐标数据，经过计算机系统的数据处理和分析，最终准确还原出被测物体的三维形状和精确位置信息^[2]。

技术特点：激光跟踪测量技术具有多项显著优势：首先，其测量精度可达微米级别，能够满足高精度测量需求；其次，测量范围可达数十米，适用于大型物体的测量；再次，测量速度极快，可实现实时动态测量；最

后,系统具有良好的环境适应性。这些特点使其成为大型复杂设备制造过程中不可或缺的高精度测量手段,能够对装配过程进行全程实时监测和质量控制。

典型应用:在航空航天制造领域,该技术被广泛应用于飞机机翼、机身等大型部件的装配测量和质量检测;在汽车制造业中,则主要用于发动机、变速器等关键部件的装配精度检测和工艺验证;此外,在大型机械装备、船舶制造等领域也有重要应用。

(二) 机器视觉测量技术

原理深入:机器视觉测量技术是融合了光学成像、数字图像处理和计算机视觉等多项技术的综合测量方法。其核心是通过高分辨率工业摄像机获取被测物体的清晰数字图像,然后运用先进的图像处理算法(如边缘检测、特征提取等)对图像进行分析处理,精确提取出物体的几何特征参数,包括尺寸、形状、位置等信息。整个过程实现了对被测物体的非接触式测量,避免了传统接触式测量可能带来的损伤。

技术优势:机器视觉测量技术具有诸多突出特点:非接触测量方式保证了被测物体的完整性;测量速度极快,可实现高速在线检测;测量精度可达亚像素级别;系统可高度自动化集成到生产线中。此外,该技术对测量环境适应性强,能够对微米级尺寸的物体和具有复杂几何形状的工件进行精确测量,解决了传统测量方法难以应对的挑战^[3]。

行业应用:在电子制造行业,该技术被广泛应用于电路板的焊点质量检测、芯片封装尺寸测量等关键工序;在精密机械加工领域,则主要用于零部件的表面缺陷自动检测和形状误差测量;同时,在食品包装、医药生产等行业也有重要应用价值。

(三) 三坐标测量技术

工作原理:三坐标测量仪是基于笛卡尔坐标系原理设计的高精度测量设备,通过三个相互垂直的运动轴(X、Y、Z轴)来确定测量点的空间位置。测量时,精密测头与被测物体表面接触,采集大量特征点的三维坐标数据,这些数据经过专业测量软件的数学处理和统计分析,最终获得被测物体的精确尺寸参数和形状特征。现代三坐标测量机还配备了先进的温度补偿系统和误差修正算法,进一步提高了测量精度。

技术特性:三坐标测量技术的主要优势包括:测量精度极高,最高可达亚微米级;测量结果稳定可靠,重复性好;测量范围广泛,可适应不同尺寸的工件;测量功能全面,可进行尺寸、形状、位置等多种几何参数的

测量。这些特点使其成为工业制造领域通用的精密测量解决方案。

实践应用:在模具制造行业,该技术是模具尺寸检测和质量控制的核心手段;在机械加工领域,用于各类精密零件的尺寸检测和形位公差测量;在汽车零部件制造中,则专门用于发动机缸体、曲轴、变速箱壳体等关键部件的几何形状测量和质量验证^[4]。此外,该技术还在航空航天、电子电器等多个高端制造领域发挥着重要作用。

三、数字化测量技术在机电工程复杂设备装配精度保障中的应用案例分析

(一) 案例一:航空发动机装配中的激光跟踪测量技术应用

装配背景:航空发动机是一种高度复杂的机电设备,其装配精度要求极高。发动机的转子、静子等部件的装配精度直接影响发动机的性能和可靠性。

应用过程:在航空发动机装配过程中,采用激光跟踪测量技术对转子和静子的装配位置进行实时监测。在转子和静子上安装靶标,激光跟踪仪实时测量靶标的坐标,将测量数据传输到计算机中进行处理和分析。通过与设计模型进行对比,及时调整装配位置,确保装配精度。

应用效果:通过应用激光跟踪测量技术,航空发动机的装配精度得到了显著提高,装配效率也大幅提升。同时,减少了装配过程中的调整和返工次数,降低了生产成本。

(二) 案例二:汽车变速器装配中的机器视觉测量技术应用

装配背景:汽车变速器是汽车动力系统的关键部件之一,其装配精度对汽车的换挡平顺性和动力传输效率有重要影响。

应用过程:在汽车变速器装配线上,采用机器视觉测量技术对齿轮、轴等零部件的尺寸和装配位置进行检测。摄像机实时采集零部件的图像,通过图像处理算法分析零部件的尺寸和位置信息。如果检测到不合格的零部件,系统会自动发出警报并进行标记,以便及时处理。

应用效果:机器视觉测量技术的应用提高了汽车变速器的装配质量和一致性,减少了因装配精度问题导致的故障发生率。同时,实现了装配过程的自动化检测,提高了装配效率。

四、数字化测量技术在机电工程复杂设备装配中的发展趋势

(一) 智能化发展

人工智能技术的深度渗透正推动数字化测量系统从

“被动采集”向“主动决策”升级。通过集成机器学习算法与深度学习模型，测量系统可自主识别复杂设备的关键装配特征，如精密齿轮的齿形参数、轴承座的孔系位置等，实现测量对象的智能分类与参数匹配。基于历史装配数据构建的预测模型，能够动态优化测量路径，减少冗余检测步骤，将大型设备的测量效率提升30%以上。更重要的是，系统可根据实时测量结果自动生成装配调整方案，例如在航空发动机转子装配中，通过分析叶片间隙数据实时调整定位参数，实现“测量-分析-修正”的闭环智能控制，显著降低人为操作误差，保障装配精度长期稳定性^[5]。

（二）多传感器融合

单一传感器在复杂装配场景中难以兼顾测量范围、精度与效率，多传感器融合技术通过构建“优势互补”的测量网络突破这一局限。激光跟踪仪擅长大空间三维坐标测量，可覆盖数十米范围内的设备整体定位；机器视觉系统借助高分辨率相机捕捉细微特征，适用于螺纹孔、密封面等精密部件的缺陷检测；三坐标测量机则聚焦小尺寸构件的高精度参数采集，精度可达微米级。通过工业互联网实现传感器数据的实时交互与时空校准，形成“宏观定位-中观检测-微观校准”的多层级测量体系。例如在风电主机装配中，激光跟踪仪确定机舱整体位置，视觉系统检测法兰平面度，三坐标测量机校准轴承孔公差，三者数据融合后可将装配合格率提升至99%以上。

（三）与虚拟装配技术的结合

虚拟装配技术与数字化测量的深度融合，构建了“数字孪生驱动”的装配新模式。通过将实时测量数据接入设备的数字孪生模型，可在虚拟空间中动态还原装配过程，实现物理实体与虚拟模型的毫米级精度映射。在航天器舱段对接中，测量系统实时采集法兰连接面的三维坐标，虚拟平台同步模拟对接姿态，提前预警可能出现的干涉风险，并生成最优调整路径。此外，基于测量数据的虚拟仿真可实现装配工艺的离线优化，例如在核电压力容器装配前，通过虚拟测试不同螺栓预紧力对应的密封性能，结合实测的法兰变形数据，确定最佳装配参数，将现场试装次数减少60%以上，大幅缩短研发周期。

（四）在线测量和实时监测

工业物联网与边缘计算技术的应用，推动测量系统从“离线抽检”转向“全程在线监测”。在大型生产线中，分布式传感器网络可实时采集关键工位的装配数据，

如数控机床主轴的径向跳动、机器人焊接的焊缝尺寸等，数据通过5G网络传输至边缘计算节点，实现毫秒级响应的实时分析。当检测到参数偏离阈值时，系统立即触发调整指令，例如在高铁转向架装配中，实时监测轮对轴距偏差并自动修正定位工装，避免不合格品流入下道工序。同时，基于大数据构建的过程能力分析模型，可追踪装配全周期的测量数据波动趋势，识别潜在质量隐患，为设备的预防性维护提供数据支撑，显著提升复杂设备的装配可靠性与一致性。

结论

本文深入探讨了机电工程复杂设备装配精度保障的重要作用和面临的挑战，详细介绍了常见的数字化测量技术，包括激光跟踪测量技术、机器视觉测量技术和三坐标测量技术等。通过实际案例分析了数字化测量技术在提高装配精度、提升装配效率等方面的应用效果。研究结果表明，数字化测量技术在机电工程复杂设备装配精度保障中具有重要的应用价值。

尽管数字化测量技术在机电工程复杂设备装配中已经取得了一定的应用成果，但仍存在一些问题需要进一步研究和解决。未来，应加强数字化测量技术的智能化、多传感器融合和在线测量等方面的研究，不断提高数字化测量技术的性能和应用水平，为机电工程复杂设备的高质量装配提供更加有力的技术支持。同时，应加强数字化测量技术与其他先进制造技术的集成应用，推动机电工程制造业的智能化和数字化发展。

参考文献

- [1] 李永鹏. 数字化测量技术在飞机制造, 装配中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(5): 3.
- [2] 唐雪英. 邹议数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用[J]. 包装世界, 2021(8): 57-58.
- [3] 郑璐晗, 杜兆才, 陈龙. 基于三维激光扫描技术的装配间隙补偿方法研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 000(004): 24-29, 37. DOI: CNKI: SUN: SDJL.0.2020-04-011.
- [4] 姜子龙, 朱承祥. 数字化测量技术在无人机装配中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(8): 2.
- [5] 叶顺坚, 梁莹, 刘立安, 等. 数字化激光投影技术的研究与应用[J]. 机械制造与自动化, 2022(051-001).