

基于数字孪生的飞机部件装配过程优化

王 超

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 在航空工业中,飞机部件装配的复杂性和对精度的苛刻要求一直是制造过程中的核心挑战。随着数字化和智能化技术的飞速发展,数字孪生技术应运而生,为飞机部件装配过程的优化提供了新的契机。本文深入探讨了数字孪生技术在飞机部件装配中的应用潜力,分析了其优化的理论框架、关键技术、实现路径及应用前景,旨在全面提升航空制造的装配效率、质量和灵活性。

关键词: 数字孪生;飞机部件装配;装配优化;虚拟仿真;智能决策系统

引言

飞机部件装配作为航空制造的关键环节,其装配效率和质量直接关系到飞机的整体性能和安全性。传统的装配方法受限于物理原型和试错法,已无法满足现代航空工业对高效率、高质量装配的迫切需求。数字孪生技术,通过构建物理实体与虚拟模型之间的实时映射关系,为飞机部件装配过程的优化提供了全新的视角和解决方案。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生的基本定义

数字孪生是一种基于多源异构数据融合、模型构建与仿真、实时映射与交互以及智能决策与优化的先进技术。它通过虚拟模型对物理实体进行全方位、全生命周期的模拟和预测,实现物理世界与数字世界的深度融合。

1.2 数字孪生的核心技术

1.2.1 多源异构数据采集与融合技术

在飞机部件装配过程中,数据是构建数字孪生模型的基础,而这些数据往往来源于不同的传感器、设备、工艺系统和历史数据库,具有多样性、异构性和复杂性等特点。多源异构数据采集技术需要解决不同数据源之间的接口、协议和数据格式等问题,确保数据能够顺畅地从物理世界传输到数字世界。这通常涉及到物联网技术的应用,通过部署各种传感器和设备,实时感知和采集飞机部件装配过程中的关键数据。同时,还需要借助网络通信和数据传输技术,确保数据的实时性和准确性。在数据采集的基础上,多源异构数据融合技术则需要对来自不同数据源的数据进行清洗、对齐、关联和融合等操作。这需要借助数据预处理、数据挖掘和机器学习等技术手段,对原始数据进行去噪、滤波、插值和归一化等处理,以消除数据中的异常值、噪声和冗余信息^[1]。同时,还需要利用数据关联和融合算法,将不同数据源的数据

进行有机结合,形成可用于数字孪生模型构建和仿真的高质量数据集。

1.2.2 高精度模型构建与仿真技术

为了构建高精度的几何模型、物理模型和行为模型,需要综合运用先进的建模方法和仿真算法。几何模型是飞机部件装配数字孪生的基础,它能够准确反映部件的几何特征、尺寸和位置关系。借助三维扫描、计算机辅助设计等手段,可以构建出精细的几何模型,为后续的物理仿真和行为模拟提供准确的几何基础。物理模型则关注部件的材料属性、力学行为和装配过程中的物理变化。通过引入有限元分析、多体动力学等方法,可以模拟部件在装配过程中的受力、变形和振动等物理行为,从而更深入地理解装配过程的动态特性。行为模型则是对装配过程中各种操作、决策和交互行为的抽象和模拟。通过引入人工智能、机器学习等技术,可以构建出能够学习和适应不同装配环境和任务的行为模型,实现装配过程的智能化和自动化。

1.2.3 实时映射与交互技术

在飞机部件装配过程中,实时映射与交互技术能够确保数字孪生系统同步、准确地反映物理世界的最新状态,并为装配决策提供及时、有效的支持。通过物联网技术的运用,装配现场的各种传感器和设备可以实时感知和采集关键数据,如部件的位置、姿态、温度、应力等。这些数据经过处理后,通过云计算和边缘计算技术迅速传输到数字孪生系统中,实现物理实体与虚拟模型之间的实时数据映射。云计算提供了强大的计算能力和存储空间,可以处理和分析海量的装配数据,确保数字孪生系统的稳定运行和高效计算。而边缘计算则能够在数据源头进行预处理和分析,降低数据传输的延迟,提高系统的实时响应能力。实时映射不仅要求数据的同步更新,还需要保证数据的准确性和一致性。因此,需要

采用先进的数据同步算法和校验机制,确保物理世界与数字世界之间的数据一致性和完整性。此外,交互技术也是实现数字孪生系统人机交互的重要手段。借助虚拟现实、增强现实等技术,操作人员可以直观地观察和操作虚拟模型,实现与数字孪生系统的自然交互。这种交互方式不仅可以提高操作人员的沉浸感和操作效率,还可以为远程协作和培训提供新的可能。

1.2.4 智能决策与优化技术

智能决策与优化依赖于大数据分析和人工智能算法,通过对装配过程中产生的海量数据进行深度挖掘和分析,以实现装配决策的智能化和装配流程的优化。在智能决策方面,借助先进的数据分析技术,可以对装配过程中的各种因素进行综合考虑,包括装配序列、工艺参数、设备状态、人员技能等。通过构建智能决策模型,可以自动或半自动地生成最优的装配方案,从而指导实际装配操作,提高装配效率和质量。在优化方面,人工智能算法发挥着至关重要的作用。利用机器学习、深度学习等算法,可以对装配数据进行模式识别、趋势预测和性能优化。例如,通过对历史装配数据的分析,可以发现装配过程中的瓶颈和浪费,进而对装配流程进行优化,提高生产效率和资源利用率。此外,智能决策与优化还可以应用于故障预测与健康管理。通过对装配过程中的异常数据进行监测和分析,可以及时发现潜在的故障风险,并制定相应的维护策略,从而确保装配过程的稳定性和可靠性。

2 基于数字孪生的飞机部件装配过程优化方法

2.1 装配序列与路径的智能优化

装配序列与路径的智能优化是现代制造业追求高效、高质量生产的关键环节。在飞机部件装配领域,借助数字孪生技术,我们可以实现装配过程的虚拟模拟与智能优化,进而提升装配效率和质量。数字孪生技术通过构建与物理实体相对应的虚拟模型,在虚拟环境中模拟不同装配序列和路径对装配效率和质量的影响。这种模拟不仅考虑了部件的几何形状和物理属性,还综合了装配过程中的各种动态行为和影响因素,如装配工具的可达性、装配操作的干涉性等。通过精确模拟,我们可以预测不同装配序列和路径下的装配时间和质量指标,为优化提供数据支持。在优化机理方面,我们利用智能算法对虚拟仿真数据进行处理和分析,求解最优装配序列和路径。这些智能算法,如遗传算法、蚁群算法等,能够综合考虑多个优化目标,如装配时间最短、质量最高、成本最低等,通过迭代计算找到最优解或近似最优解。这样,我们就可以在众多的装配方案中选择出最佳

的一种,从而指导实际装配过程^[2]。在实际操作中,我们首先根据飞机部件的装配需求和约束条件,构建相应的数字孪生模型。然后,通过虚拟仿真软件模拟不同装配序列和路径下的装配过程,收集相关数据。接下来,利用智能算法对仿真数据进行处理和分析,求解最优装配序列和路径。最后,将优化结果应用于实际装配过程中,通过对比验证优化效果,并不断完善和优化数字孪生模型和智能算法。

2.2 工艺参数的精确调整与优化

在飞机部件装配过程中,工艺参数的精确调整与优化对于确保装配质量和提升效率至关重要。传统的方法往往依赖于经验试错,不仅效率低下,而且难以保证装配结果的一致性。然而,数字孪生技术的引入为工艺参数的精确调整与优化提供了新的解决方案。数字孪生模型能够模拟不同工艺参数下的装配过程,包括装配力、装配速度、温度、润滑条件等关键因素。通过虚拟仿真,可以系统地分析这些参数变化对装配质量和效率的影响规律。例如,装配力的微小调整可能会导致部件配合间隙的变化,进而影响装配的精确性和稳固性;而装配速度的优化则可以在保证质量的前提下提升生产效率。数字孪生技术结合了大数据分析、人工智能等先进技术,对仿真数据进行深入挖掘和处理。通过构建预测模型、优化算法等手段,可以精确地预测不同工艺参数下的装配结果,并自动调整参数设置以达到最优装配效果。这种基于数据的优化方法不仅提高了调整的准确性和效率,还降低了对人工经验的依赖。在实际操作中,工艺参数的精确调整与优化是一个迭代的过程。首先,根据初始的工艺参数进行虚拟仿真,分析仿真结果并识别潜在的问题和改进点。然后,利用优化算法对工艺参数进行调整,再次进行仿真验证。通过不断地迭代优化,可以逐步逼近最优的工艺参数组合,从而实现装配质量和效率的双重提升。

2.3 装配过程的实时监控与智能调控

在飞机部件装配过程中,实时监控与智能调控是确保装配稳定性和可靠性的关键环节。传统的装配过程监控往往依赖于人工巡检和事后检测,这种方式不仅效率低下,而且难以及时发现并处理潜在问题。然而,借助数字孪生技术,我们可以实现装配过程的实时监控与智能调控,从而提升装配质量和效率。通过实时采集装配过程中的关键数据,如装配力、位移、温度、振动等,我们可以获取装配过程的实时状态信息。这些数据经过处理后,与数字孪生模型进行实时对比和分析,从而实现

期范围,系统可以立即发出警报,并提示潜在问题的性质和位置。在智能调控方面,数字孪生技术可以根据实时监控数据对装配过程进行动态调整。通过调整装配参数、优化装配路径或更换装配工具等方式,系统可以自动或半自动地纠正装配过程中的偏差和错误,确保装配过程的稳定性和可靠性。这种智能调控不仅可以减少人工干预的需求,还可以提高装配的灵活性和适应性^[3]。在实际操作中,实时监控与智能调控需要依赖于先进的传感器网络、数据采集系统和智能控制算法。传感器网络负责实时采集装配过程中的关键数据,数据采集系统负责数据的处理和分析,而智能控制算法则负责根据数据分析结果进行智能调控。这些技术的结合使得装配过程的监控和调控更加精确、高效和可靠。

2.4 故障预测与健康管理

飞机部件装配过程中的故障预测与健康管理对于确保飞行安全至关重要。传统的维护方法往往是事后处理,难以预防潜在故障的发生。然而,基于数字孪生技术的故障预测与健康管理系统为这一问题提供了创新的解决方案。该系统能够实时监测飞机部件的健康状态,通过收集和分析各种传感器数据,如温度、压力、振动等,来评估部件的工作性能和剩余寿命。一旦发现异常或潜在故障迹象,系统可以迅速做出反应,预测故障发生的时间、位置和可能的影响,从而提前制定维护策略,避免装配过程中的故障风险。故障预测与健康管理系统结合了大数据分析和机器学习算法,对监测数据进行深度挖掘和模式识别。通过构建故障预测模型,系统可以学习历史故障数据,识别故障发生的先兆和规律,从而实现对潜在故障的准确预测。同时,系统还可以根据部件的健康状态和维护历史,优化维护策略,提高维护的针对性和有效性。故障预测与健康管理系统需要与飞机部件的传感器网络紧密集成,确保数据的实时性和准确性。此外,还需要建立完善的故障数据库和维护知识库,为系统的学习和决策提供支持。通过不断地迭代优化和更新,系统可以逐步提升故障预测的准确性和维护策略的智能化水平。

3 数字孪生在飞机部件装配中的应用挑战与展望

3.1 应用挑战

在数字孪生技术的应用过程中,如何确保数据的安

全性和隐私性是一个重要挑战。需要采取有效的加密、访问控制和数据脱敏等措施来保护敏感数据不被泄露和滥用。此外,高精度模型往往伴随着高计算成本,如何在保证模型精度的同时提高计算效率是数字孪生技术面临的另一个挑战。可以采用模型降阶、并行计算和云计算等技术手段来平衡模型精度和计算效率的关系^[4]。同时,不同数字孪生平台之间的数据格式和模型标准可能存在差异,如何实现跨平台集成和标准化是数字孪生技术大规模应用的前提。需要制定统一的数据交换和模型标准,推动不同平台之间的互操作性和兼容性。

3.2 展望

随着技术的不断进步和应用场景的拓展,数字孪生在飞机部件装配中的应用将更加广泛和深入。未来研究方向包括:增强模型的自适应能力和学习能力,使其能够更好地应对复杂多变的装配环境;实现装配过程的智能化和自动化,提高装配效率和质量;探索数字孪生与增强现实、虚拟现实等技术的结合,构建更加直观、高效的装配指导系统。

结语

本文深入研究了基于数字孪生的飞机部件装配过程优化方法,从装配序列与路径优化、工艺参数调整与优化、装配过程实时监控与智能调控以及故障预测与健康管理等方面进行了详细探讨。数字孪生技术为飞机部件装配过程的优化提供了有力支持,有助于提高航空制造的效率和质量。然而,在实际应用中仍需解决数据安全与隐私保护、模型精度与计算效率平衡以及跨平台集成与标准化等挑战。展望未来,随着技术的不断发展和完善,数字孪生将在航空制造领域发挥更大的作用,推动航空工业的持续发展。

参考文献

- [1]方磊.飞机结构装配工艺性审查技术探讨[J].中国设备工程,2021,01:99-100.
- [2]赵一伾,邱晔,沈波,王锋涛.基于模块的飞机装配工艺技术研究[J].航空制造技术,2021,06:63-67.
- [3]王宏锋,万蕾.基于虚拟现实(VR)的飞机部件装配工艺技术研究与应用[J].航空制造技术,2020,03:39-43.
- [4]张棚翔.基于数字孪生的通飞产品装配工艺规划与仿真技术研究[D].河北科技大学,2021,09:56-58.