

数字孪生技术在自动化仪表全生命周期管理中的应用研究

段 彤

北京铝能清新环境技术有限公司 北京 100000

摘 要: 本文聚焦于从具体技术角度探讨数字孪生技术在自动化仪表全生命周期管理中的应用。首先阐述数字孪生技术的核心架构与关键技术,接着详细论述数字孪生技术在自动化仪表设计、制造、安装调试、运行维护以及报废回收各阶段的具体技术应用,包括建模技术、数据交互技术、仿真分析技术等。旨在为自动化仪表行业借助数字孪生技术提升管理水平提供技术参考与实践指引。

关键词: 数字孪生技术; 自动化仪表; 全生命周期管理; 技术应用

1 引言

在工业自动化快速发展的当下,自动化仪表作为工业生产过程中的关键感知与控制设备,其性能与可靠性直接影响生产系统的稳定运行和产品质量。自动化仪表全生命周期管理涉及从设计、制造、安装调试、运行维护到报废回收的整个过程,传统管理方式存在信息不透明、协同效率低、维护成本高、难以精准预测故障等问题。数字孪生技术作为一种新兴的数字化技术,通过创建物理实体的虚拟镜像,实现物理世界与虚拟世界的实时交互与深度融合。它为自动化仪表全生命周期管理提供了全新的技术手段,能够在虚拟环境中对仪表进行全生命周期的模拟、分析和优化,从而提高管理效率、降低成本、提升产品质量和可靠性。因此,从具体技术角度深入研究数字孪生技术在自动化仪表全生命周期管理中的应用具有重要的现实意义。

2 数字孪生技术核心架构与关键技术

2.1 核心架构

数字孪生技术的核心架构主要包括物理实体、虚拟模型、数据交互和孪生服务四个部分。(1) 物理实体: 即实际的自动化仪表,它通过各种传感器实时采集自身的状态信息,如温度、压力、流量、振动等参数。(2) 虚拟模型: 是对物理实体的数字化建模,包括几何模型、物理模型、行为模型等。几何模型描述仪表的外观和结构;物理模型反映仪表的物理特性,如力学性能、热学性能等;行为模型则模拟仪表在不同工况下的运行逻辑和功能。(3) 数据交互: 通过传感器网络、通信协议等实现物理实体与虚拟模型之间的数据传输和交互。物理实体将实时数据传输到虚拟模型,虚拟模型根据这些数据更新自身状态,并将分析结果和决策建议反馈给物理实体^[1]。(4) 孪生服务: 基于虚拟模型和数据

交互,提供各种服务,如状态监测、故障诊断、性能预测、优化决策等,以支持自动化仪表全生命周期管理。

2.2 关键技术

建模技术: 建模是数字孪生技术的基础,包括几何建模、物理建模和行为建模。几何建模可以使用计算机辅助设计(CAD)软件实现;物理建模需要运用力学、热学、电磁学等多学科知识,结合有限元分析(FEA)、计算流体动力学(CFD)等方法;行为建模则要基于自动化仪表的控制逻辑和工作流程,采用状态机、Petri网等建模方法。

数据采集与传输技术: 数据采集主要依靠各种传感器,如温度传感器、压力传感器、流量传感器等。传感器需要具备高精度、高可靠性和实时性。数据传输技术包括有线通信(如以太网、现场总线)和无线通信(如Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、LoRa等),要确保数据的准确、及时传输。

数据融合与分析技术: 来自不同传感器和系统的数据需要进行融合处理,以消除数据冗余和矛盾,提高数据的准确性和完整性。数据融合算法包括卡尔曼滤波、贝叶斯估计等。数据分析技术则运用机器学习、深度学习、数据挖掘等方法,从海量数据中提取有价值的信息,如故障特征、性能趋势等。

仿真分析技术: 仿真分析是数字孪生技术的核心功能之一,通过对虚拟模型进行各种工况下的仿真实验,预测物理实体的性能和行为。仿真分析技术包括动力学仿真、热力学仿真、电磁仿真等,常用的仿真软件有ANSYS、MATLAB/Simulink等。

可视化技术: 可视化技术将虚拟模型和数据分析结果以直观的图形、图像形式展示出来,方便用户理解和操作。可视化技术包括三维建模与渲染、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)等。

3 数字孪生技术在自动化仪表全生命周期各阶段的应用

3.1 设计阶段

多物理场耦合建模：在自动化仪表设计阶段，需要考虑多种物理场的相互作用，如力学、热学、电磁学等。利用数字孪生技术中的多物理场耦合建模方法，可以创建仪表的虚拟模型，模拟不同物理场下的仪表性能。例如，在设计一款智能压力变送器时，通过多物理场耦合建模可以分析压力传感器在高温、高压环境下的力学变形和热应力分布，以及电磁干扰对电路性能的影响，从而优化仪表的结构设计和电路布局。

虚拟样机测试与优化：基于虚拟模型进行虚拟样机测试，可以在不制作物理样机的情况下，对仪表的功能和性能进行全面测试。通过模拟各种工况和故障场景，发现设计中的缺陷和问题，并及时进行优化^[2]。例如，在测试仪表的抗干扰能力时，可以在虚拟环境中模拟不同的电磁干扰源，观察仪表的输出响应，调整电路参数和屏蔽措施，提高仪表的抗干扰性能。

协同设计与知识共享：数字孪生技术提供了一个协同设计平台，不同专业领域的设计人员可以在虚拟模型上进行实时协作。同时，通过知识管理系统，将设计过程中的经验和知识进行积累和共享，提高设计效率和质量。例如，机械工程师、电子工程师和软件工程师可以在虚拟模型上共同讨论仪表的设计方案，实时查看和修改设计参数，避免设计冲突和重复工作。

3.2 制造阶段

制造过程仿真与工艺优化：利用数字孪生技术对自动化仪表的制造过程进行仿真模拟，包括加工工艺、装配工艺等。通过分析制造过程中的参数变化和设备运行状态，优化工艺参数和生产流程，提高生产效率和产品质量。例如，在仪表的电路板焊接过程中，通过仿真模拟可以确定最佳的焊接温度、时间和压力等参数，减少焊接缺陷的产生。

实时质量检测与控制：在制造过程中，通过在生产设备和仪表上安装传感器，实时采集生产数据和仪表质量数据。数字孪生模型将这些数据与预设的质量标准进行比对，实时监测产品质量。一旦发现质量问题，及时发出警报并进行调整。例如，在仪表的外壳加工过程中，通过传感器实时测量外壳的尺寸精度和表面粗糙度，当超出允许范围时，自动调整加工设备的参数，确保产品质量符合要求。

生产调度与资源管理：数字孪生技术可以实现对生产过程的实时监控和调度，根据订单需求和生产资源状

况，合理安排生产任务和设备使用。同时，对原材料、零部件等资源进行动态管理，确保生产的连续性和高效性。例如，通过数字孪生模型可以实时掌握生产设备的运行状态和产能情况，根据订单优先级合理分配生产任务，避免设备闲置和生产瓶颈。

3.3 安装调试阶段

虚拟安装与空间布局优化：在自动化仪表安装前，利用数字孪生技术创建安装现场的虚拟模型，将仪表的虚拟模型与安装现场模型进行融合。通过虚拟安装，可以模拟仪表在现场的安装位置和空间布局，检查是否存在空间干涉、布线不合理等问题，并提前进行优化^[3]。例如，在一个大型化工装置中，通过虚拟安装可以确定仪表在管道系统中的最佳安装位置，避免与其他设备或管道发生碰撞，同时优化布线方案，减少信号干扰。

远程调试与故障诊断：对于一些复杂的自动化仪表系统，可能需要在不同地点进行安装和调试。数字孪生技术支持远程访问和协作，技术人员可以通过网络连接到数字孪生模型，实时查看仪表的运行状态和调试数据，进行远程调试和故障诊断。例如，当仪表在偏远地区的工厂出现安装调试问题时，专家可以通过数字孪生模型远程指导现场技术人员进行操作，快速解决问题，提高调试效率。

调试数据记录与分析：在安装调试过程中，数字孪生模型可以记录所有的调试数据，包括仪表的参数设置、运行状态、故障信息等。通过对这些数据的分析，可以总结调试经验，优化调试流程，同时为后续的运行维护提供参考。例如，分析调试过程中出现的故障数据，找出故障的常见原因和解决方法，制定相应的预防措施。

3.4 运行维护阶段

实时状态监测与预警：在自动化仪表运行过程中，通过传感器实时采集仪表的运行数据，并将其传输到数字孪生模型中。数字孪生模型对数据进行实时分析和处理，监测仪表的运行状态，如温度、压力、流量等参数的变化趋势。当出现异常数据时，模型自动发出预警信号，通知维护人员及时处理。例如，当仪表的测量值出现异常波动时，数字孪生模型可以通过分析历史数据和实时数据，判断是传感器故障、电路故障还是其他原因导致的，并给出相应的预警信息。

故障诊断与定位：基于数字孪生模型的历史数据和实时监测数据，运用机器学习和数据分析算法，对自动化仪表的故障进行诊断和定位。通过建立故障诊断模型，将实际运行数据与模型中的正常数据进行比对，找

出故障特征和规律,确定故障的类型和位置。例如,对于智能流量计,通过分析流量信号的频率、幅度等特征,结合数字孪生模型中的故障知识库,可以准确诊断出流量计的堵塞、磨损等故障,并定位到具体的传感器或部件。

预测性维护与寿命评估:利用数字孪生技术对自动化仪表的剩余使用寿命进行预测,制定合理的维护计划。通过对仪表的运行数据和历史故障数据进行分析,建立寿命预测模型,预测仪表关键部件的磨损程度和剩余寿命。根据预测结果,提前安排维护工作,如更换部件、进行校准等,避免设备突发故障,减少停机时间^[4]。例如,对于压力传感器的弹性元件,通过数字孪生模型分析其受力情况和疲劳损伤,预测其剩余寿命,在元件失效前进行更换,确保仪表的可靠运行。

性能优化与升级:在运行过程中,数字孪生模型可以根据实际运行数据对自动化仪表的性能进行评估和分析,发现性能瓶颈和改进空间。通过调整仪表的控制参数、优化算法等方式,对仪表进行性能优化和升级。例如,对于智能调节阀,通过数字孪生模型分析其调节性能和响应速度,调整控制算法中的参数,提高调节阀的调节精度和稳定性。

3.5 报废回收阶段

资产评估与决策支持:在自动化仪表达到报废期限时,数字孪生模型中存储了仪表在整个生命周期内的各种数据,包括设计参数、制造信息、运行维护记录等。通过对这些数据的分析,可以对仪表的剩余价值进行评估,为企业的报废决策提供依据。例如,根据仪表的使用年限、维护成本、性能状况等因素,判断是进行报废处理还是进行二手销售或再制造。

环保回收与资源再利用:数字孪生技术可以帮助企业实现自动化仪表的环保回收和资源再利用。通过对仪表的结构和材料进行分析,制定合理的回收方案,确保

回收过程中的环境安全和资源最大化利用。例如,对于含有有害物质的仪表部件,可以通过数字孪生模型确定其位置和处理方法,避免对环境造成污染;对于可回收利用的材料,如金属、塑料等,可以进行分类回收和再加工。

结语

从具体技术角度来看,数字孪生技术在自动化仪表全生命周期管理中具有广泛的应用前景。通过建模技术、数据交互技术、仿真分析技术等关键技术的应用,数字孪生技术可以实现自动化仪表在设计、制造、安装调试、运行维护和报废回收等各个阶段的优化管理,提高管理效率、降低成本、提升产品质量和可靠性。然而,数字孪生技术的应用也面临着数据质量、模型复杂度、技术集成和人才短缺等挑战,需要企业、行业协会和政府共同努力,采取相应的对策加以解决。未来,数字孪生技术将与新兴技术深度融合,向更广泛的工业领域拓展,构建更加智能的工业生态系统,并注重可持续发展和绿色制造。相信在各方的共同努力下,数字孪生技术将在自动化仪表全生命周期管理中发挥更大的作用,推动工业行业向智能化、绿色化方向发展。

参考文献

- [1]沈世贤,王建国,冯勇,等.面向数字孪生工厂的多模态仪表数据异常检测[J].微电子学与计算机,2025,42(01):65-74.
- [2]卢铁林,岳磊,汪烁,等.数字孪生驱动的仪器仪表边缘数据管理系统设计[J].自动化与仪器仪表,2021,(04):82-85.
- [3]孙柏林,刘哲鸣.解耦数字孪生,赋能仪器仪表行业转型升级[J].仪器仪表用户,2020,27(02):89-91+25.
- [4]要振宏,李飞鹏,郭旋,等.数字孪生自主引擎在智慧电厂的应用[J].电子技术,2024,53(11):398-399.