

数字孪生技术在光纤智能制造系统中的应用与实现

邵明明 邵继保 冯青凯 路方华

义博通信设备集团股份有限公司 河北河间 062450

摘要：在当下光纤制造朝着智能化转变的进程里，遇到了生产流程繁杂、参数调控险阻以及质量管控滞后等诸多问题。数字孪生技术可借助虚实映射达成全流程的动态管控，为解决上述这些痛点开辟一条新的途径。本文将数字孪生技术与光纤智能制造系统的融合作为核心内容，先是阐释二者的基本概念，接着设计技术应用架构，最后围绕预制棒制备、拉丝等关键环节，详细叙述技术落地的实现方式，以此为光纤智能制造朝着高效化、精准化方向发展提供实践方面的参考。

关键词：数字孪生；光纤；智能制造；应用实现

引言

光纤作为信息传输的核心载体，它的制造水平直接关系到通信、能源等领域的发展情况。目前智能制造已成为产业升级的核心方向，这对生产精度、效率以及柔性化方面提出了更高的要求。数字孪生技术依靠虚实融合、实时交互以及全生命周期管控的能力，为推动光纤制造从传统模式转变为智能化提供了关键的支撑，其应用对于提升光纤产业竞争力、帮助制造业数字化转型有着意义。

一、数字孪生技术与光纤智能制造系统的概述

1. 数字孪生技术

数字孪生技术是工业4.0的关键核心技术之一，借助整合物理模型、传感器数据以及运行历史等多方面的信息资源，于虚拟空间里搭建起物理实体的动态数字化复制品，达成全生命周期内虚实之间的映射以及协同优化。其核心架构囊括物理层、数据层、模型层、服务层以及交互层，物理层中的传感器与物联网设备负责采集温度、振动等各类实时数据，经过数据层的清洗并标准化处理后，促使模型层的几何、物理以及数据驱动混合模型进行动态更新。此项技术拥有实时性、高保真度、双向性以及闭环性等特性，借助5G、MQTT等技术达成虚实之间毫秒级别的同步，依靠AI算法来完成故障预测以及参数优化，再经由执行器反向调控物理实体，形成“感知-分析-决策-执行”的闭环流程。在制造业领域，它可借助虚拟仿真、预测性维护等服务，推动生产模式由经验驱动朝着数据驱动方向转变。

2. 光纤智能制造系统

光纤智能制造系统是一种将高精度装备、数据传感

以及智能管控融合在一起的一体化生产体系，该体系囊括了从预制棒制备开始，经过拉丝、涂覆固化，一直到检测收卷的整个流程。此系统以MES制造执行系统作为核心，借助1.2万多个传感器以及微距摄像机等设备，每秒可采集将近一万条如温度、张力、光纤直径等数据。依靠PLC、DCS控制系统以及AI算法，可达成对拉丝炉2200℃高温的调控以及对光纤直径微米级的控制等精准操作，再搭配上AGV智能物流以及在线SPC质量分析，形成“数据采集-智能分析-精准执行”的闭环。它的模块化架构可以适应多种规格的生产需求，促使光纤制造从人工干预朝着自主优化转变。

二、数字孪生技术在光纤智能制造系统中的应用架构设计

1. 总体架构设计思路

整体架构设计将“虚实深度融合、全流程闭环管控”当作核心内容，依靠数字孪生三元系统的本质特性，搭建出适合光纤制造整个流程的分层协同架构。该设计依照模块化、可扩展性以及高可靠性的原则，把物理实体作为基础，借助虚拟模型来复制生产场景，经过双向数据交互达成智能决策。架构需要消除物理层和虚拟层之间的数据障碍，物理方面整合拉丝炉、涂覆机等设备以及数量达万级的传感器，虚拟方面构建多物理场耦合模型。利用5G与MQTT协议达成数据的实时传输，经过数据层进行清洗和标准化之后，促使模型层实现动态更新，再由应用层输出仿真优化、质量管控等服务，最终形成“感知-建模-分析-执行”的闭环体系，为光纤制造的精准化和高效化提供支撑。

2. 系统层级划分

依据光纤制造流程的特性以及数字孪生技术的逻辑,系统采用“从物理实体到智能应用”的五层递进式层级划分方式。物理层作为基础载体,整合预制棒制备机组、拉丝塔、涂覆固化设备等全流程实体,还配备光纤直径激光检测仪、炉温传感器等感知设备,可实时捕捉温度、张力等关键参数。数据层借助工业以太网与5G融合网络来汇聚多源数据,经过边缘计算节点完成降噪、归一化处理,存储于时序数据库与关系型数据库中,形成标准化数据资产。模型层构建多尺度孪生模型,其中包括预制棒几何模型、拉丝过程热场仿真模型等,依靠数据驱动来动态修正物理参数。服务层封装虚拟调试、质量预测等功能模块,借助微服务接口来支撑上层应用。交互层凭借三维可视化平台实现虚实场景同步展示,支持参数调整以及决策指令下发。

3. 光纤制造数字孪生模型的构建方法

要构建光纤制造数字孪生模型需要融合多学科技术,运用“多维度建模+动态校准”这种复合方法。首先借助CAD/CAE工具构建几何模型,精准地复刻设备结构以及生产场景,接着嵌入传热、流体力学等物理方程,建立拉丝热场、涂覆固化等物理模型。利用采集到的历史生产数据来训练机器学习模型,以此实现参数的动态修正,形成“几何-物理-数据”混合模型。采用数字线程技术将各环节模型串联起来,依靠实时数据反馈不断优化模型精度,保证虚拟模型与物理实体可有高保真映射,为全流程仿真与决策优化提供支撑。

4. 系统数据流与信息交互机制

系统数据流围绕着“感知-传输-处理-反馈”这条主线构建起闭环,信息交互借助标准化协议达成层级间的畅通连接,物理层的传感器会持续实时地采集如温度、张力等各类数据,之后凭借5G或者工业以太网将这些数据传输到数据层,在数据层由边缘节点来完成数据的清洗以及格式转换工作。标准化的数据会同步到模型层,以此驱动孪生模型进行更新,服务层依据模型输出对参数加以优化,再经由OPCUA协议把优化后的参数下发到物理层的执行器。各层级之间运用MQTT协议来实现轻量化通信,在关键节点部署数据中台以保障交互的实时性,形成“物理实体-虚拟模型-决策指令”这样的双向信息流,为全流程的动态管控提供支撑。

三、数字孪生技术在光纤智能制造系统中的应用实现

1. 预制棒制备过程的虚拟仿真与参数优化

预制棒制备环节借助数字孪生构建出多维度的虚拟

镜像,达成从原料熔融直至气相沉积整个流程的动态仿真,该模型依据分子动力学原理以及流体力学方程,精准地复刻沉积炉内温度场、气流场以及化学反应之间的耦合作用,把石英砂纯度、氢氧流量比、炉体旋转速度等15项工艺参数转变为可进行交互的仿真变量。

借助虚拟测试不同参数组合情况下的芯层折射率均匀性、包层厚度渐变曲线以及微气泡生成轨迹,可以直观地呈现沉积界面的形态演变。当模拟显示局部温度过高致使石英分子排列出现异常时,系统会自动推演载气流量的微调方案;要是检测到原料混合不均可能引发的折射率偏差,会即时生成原料喷射角度的修正参数。这种虚实联动的优化模式,可在虚拟空间完成多轮参数迭代,提前规避实际生产中可能出现的结构缺陷,为预制棒的几何精度以及光学性能提供稳定的保障。

2. 拉丝过程的动态孪生与实时监控

拉丝环节借助构建多物理场耦合的动态孪生体,达成预制棒软化、光纤拉制直至初步成型的全流程实时映射,此模型的空间分辨率为0.005毫米,时间同步精度控制在10毫秒以内,可精确复现拉丝塔18米高度范围内的物理状态变化情况。

在数据采集端,拉丝炉腔体内嵌入8组高精度红外测温探头,以此实时捕捉 $2200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的炉内温度分布状况;在炉口部署3台激光测径仪,以500Hz的采样频率获取光纤直径数据,保证监测精度达到0.1微米;在牵引机轴端安装了扭矩传感器,实时反馈2000米/分钟拉丝速度下的张力变化,数据误差控制在0.05N以内。

孪生体依据上述数据动态更新热场、应力场仿真结果,当模拟显示光纤直径偏差超过0.2微米时,会自动生成加热功率调整指令,使得拉丝炉功率响应延迟不超过0.8秒;若监测到张力波动接近1.2N临界值,会即时联动牵引机转速调节模块,凭借 $\pm 0.5\%$ 的转速微调来维持张力稳定。虚拟界面可以三维方式可视化光纤内部应力集中区域,结合历史数据预判微弯损耗风险,为现场运维提供直观的决策依据。

3. 涂覆固化环节的孪生驱动质量控制

涂覆固化环节围绕数字孪生模型展开,搭建起一套“参数预演-实时监控-偏差修正”的闭环质量控制体系,此模型可精确复现涂覆液粘度改变、紫外光能量分布以及光纤表面结合的物理过程,其同步精度被控制在20毫秒以内。系统借助涂覆机出口处的3组激光测厚仪,按照300Hz的采样频率来获取涂覆层厚度数据,监测精度可达0.5微米;在固化炉内嵌入6路紫外能量传感

器，用以实时采集800-1200mJ/cm²的紫外辐射强度；于光纤牵引路径上布置2台高分辨率相机，以此捕捉涂覆层表面的平整度，像素精度为10微米/像素。这些数据会实时传输至孪生模型，与预先设定的涂覆层厚度80-120微米、固化度≥95%等标准参数进行比对，一旦模

型检测到涂覆层厚度偏差超过5微米，便会自动计算涂覆液流量的调整量，联动供液泵进行精度为±0.2mL/min的调节；要是紫外能量低于850mJ/cm²，会即刻提升固化炉灯管功率，保证固化效果稳定。表1为涂覆固化环节核心监控参数与孪生控制标准：

表1 涂覆固化环节核心监控参数与孪生控制标准

监控参数	采集设备	监测精度	孪生控制标准	偏差修正响应时间
涂覆层厚度	激光测厚仪	±0.5微米	80-120微米	≤0.3秒
紫外辐射强度	紫外能量传感器	±20mJ/cm ²	800-1200mJ/cm ²	≤0.5秒
涂覆层表面平整度	高分辨率相机	10微米/像素	表面凹陷≤3微米	≤0.8秒
涂覆液粘度	在线粘度计	±0.01cP	25-35cP (25℃)	≤1.0秒

4. 检测与收卷阶段的智能评估与反馈

检测与收卷阶段借助数字孪生搭建起智能管控体系，该体系包含全参数评估、实时反馈以及流程联动这几个方面，借助把多维度检测数据和收卷设备运行状态整合起来，实现了对光纤质量以及收卷精度的双重保障，其中孪生模型数据更新频率能达到100Hz。在检测环节布置光时域反射仪也就是OTDR，利用其以0.1米的空间分辨率来检测光纤衰减系数，以此保证单模光纤衰减值稳定在0.3dB/km以下；偏振模色散测试仪也就是PMD测试仪会实时采集信号，将PMD值控制在0.1ps/√km以内，表面缺陷检测仪借助200万像素工业相机，以500帧/秒的速率捕捉光纤表面划痕，其识别精度为5微米。这些数据会实时传输到孪生模型中，与预先设定的质量标准进行比对生成评估报告，收卷环节，孪生体同步收卷机张力传感器（精度±0.1N）以及编码器（分辨率0.01mm）的数据，对收卷过程中光纤排列轨迹进行模拟，当检测到张力波动超过0.5N或者排线间距偏差超过0.2mm时，会立刻向收卷机控制系统发送调整指令，同时把质量评估结果反馈到前序涂覆固化环节，指导工艺参数进行微调，形成全流程质量管控闭环。

5. 多环节协同的数字孪生生产调度系统

依据各环节孪生模型的实时数据来构建协同调度系统，该系统以生产任务作为核心，借助数字线程把预制棒制备、拉丝等整个流程串联起来，将调度响应延迟控制在500毫秒以内。此系统整合了各环节设备的运行状态，像拉丝炉2200℃的实时温度以及涂覆机80-120微

米的涂覆厚度等，还结合了订单需求，运用遗传算法对生产序列进行动态优化，可同时处理200多个生产任务。要是某环节设备突然出现故障，系统会在10秒内生成备用调度方案，自动对关联环节的参数作出调整，比如把预制棒输送速度稍微调整到0.5m/min，以此保障生产可持续稳定地进行。

结语

本文聚焦于数字孪生技术同光纤智能制造系统的融合给予探讨，先是阐述技术概述，接着开展架构设计，而后实现分环节应用，构建起全流程的技术落地途径。借助动态孪生、实时监控以及协同调度等手段，切实对预制棒制备、拉丝等环节实施精准管控，为光纤制造的智能化进程提供实践范例。未来可优化模型精度以及多系统兼容性，促使数字孪生技术在光纤产业达成更深程度的价值转化。

参考文献

- [1]程相民, 韩笑. 基于数字孪生技术的三维(GIS)地理信息系统在智慧石化中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(12): 187-189.
- [2]唐啸. 电力系统数字孪生技术在精准投资中的应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024, (05): 115-117.
- [3]胡兆冰, 杨林. 数字孪生技术在高速铁路地震预警系统中的应用研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(03): 115-124.