

# 基于数字孪生技术的海关智慧实验室建设研究

韩晶 王艺凯 梁召 乔彩霞 秦士忠\* 钱仪嘉 刘巍

中国海关科学技术研究中心

DOI:10.32629/acair.v3i4.17921

**[摘要]** 随着全球贸易量的持续增长和新型传染性疾病、外来有害生物等风险的加剧,海关检验检疫工作面临着前所未有的挑战。传统实验室在检测效率、资源调度、风险预警和跨部门协同等方面存在瓶颈。数字孪生作为实现信息物理系统深度融合的核心技术,为海关实验室的智能化升级提供了全新范式。本文旨在探讨构建海关智慧实验室的数字孪生框架,详细阐述其体系架构、关键技术与实现路径。其中,重点融入了自主研发的智慧电源线技术,并创新性地提出了以前处理功能岛为核心的自动化单元设计。通过构建物理实验室与虚拟实验室实时交互、共生共智的数字孪生体,可实现实验过程全生命周期管理、检测资源动态优化配置、安全风险智能预警与追溯、以及检测能力的仿真与推演,最终形成数据驱动、实时感知、智能决策、精准执行的智慧实验室新形态,显著提升海关国门安全的保障能力和通关效率。

**[关键词]** 数字孪生; 智慧实验室; 海关检验检疫; 智慧电源线; 前处理功能岛; 检测自动化; 数据驱动  
**中图分类号:** U216.3 **文献标识码:** A

## Research on the Construction of a Smart Customs Laboratory Based on Digital Twin Technology

Jing Han Yikai Wang Zhao Liang Caixia Qiao Shizhong Qin\* Yijia Qian Wei Liu

Science and Technology Research Center of China Customs

**[Abstract]** With the continuous growth of global trade and the increasing risks of emerging infectious diseases and foreign invasive species, customs inspection and quarantine work is facing unprecedented challenges. Traditional laboratories encounter bottlenecks in testing efficiency, resource scheduling, risk early warning, and cross-departmental collaboration. Digital Twin, as a core technology for deep integration of cyber-physical systems, provides a new paradigm for the intelligent upgrade of customs inspection and quarantine laboratories. This paper aims to explore the Digital Twin framework for constructing a smart laboratory, detailing its system architecture, key technologies, and implementation path. It specifically incorporates the self-developed Smart Power Line by the Customs Science and Technology Center and innovatively proposes an automation unit design centered on Pre-processing Functional Islands. By constructing a Digital Twin entity that enables real-time interaction and symbiotic intelligence between the physical and virtual laboratories, it achieves full lifecycle management of the testing process, dynamic optimization of testing resources, intelligent early warning and tracing of security risks, and simulation of testing capabilities. Ultimately, this fosters a new form of smart laboratory that is data-driven, real-time intelligent in decision-making, and precise in execution, significantly enhancing the capability to safeguard national border security and improve customs clearance efficiency.

**[Key words]** Digital Twin; Smart Laboratory; Customs Inspection and Quarantine; Smart Power Line; Pre-processing Functional Island; Testing Automation; Data-Driven

### 引言

海关实验室是国家出入境安全的重要技术屏障,承担着传染病原、动植物疫病、有毒有害物质、商品质量等多方面的检测任务,其运作效率与准确性直接关系到国门安全、人民健康和

贸易便利化。当前,多数海关实验室仍处于自动化或初步信息化阶段,存在“信息孤岛”、过程不透明、资源调度经验化、风险预警薄弱等核心问题。

数字孪生(Digital Twin)技术的兴起,为解决上述问题提

供了强有力的技术支撑。然而,实现高保真数字孪生的关键在于对物理世界底层数据的精准、全面感知与控制。本文中自主研发的智慧电源线以及在此基础上构建的模块化前处理功能岛两项技术共同构成了数字孪生系统的底层感知与控制基石,使得构建一个与物理实验室完全对应的、全要素、全流程、全业务的数字孪生体成为可能,从而实现对物理实验室的精准洞察、智能决策和超前仿真,推动实验室向“智慧化”演进。

本文将从数字孪生智慧实验室的体系架构、关键实现技术、核心应用场景以及面临的挑战与展望四个方面,系统地阐述其构建方案。

## 1 海关智慧实验室数字孪生体系架构

海关智慧实验室的数字孪生系统是一个复杂的系统工程,其架构可划分为四个层次:物理层、数据层、模型层和应用层。其中,物理层因技术创新而发生了深刻变化。

### 1.1 物理层

集成智慧电源线与前处理功能岛的增强型物理实体。物理层是数字孪生的实体基础。在本方案中,我们引入了两项核心创新,极大地提升了物理层的智能化水平。

1.1.1 智慧电源线:本文中自主研发的智慧电源线不再是简单的供电线路,而是集电力传输、数据通信、状态感知与精确控制于一体的智能化基础设施。与传统电源线仅提供电力不同,该智慧电源线内嵌了微处理器和通信芯片,能够以“插头-插座”为最小感知单元,实时采集并上传每个接入设备的电能参数(如电压、电流、功率、能耗)和状态信息(如在线/离线、空载/负载、异常用电行为)。它具备以下核心功能:

(1)精细化管理:可精确追踪每一台设备(从大型分析仪器到小型涡旋振荡器)的启停时间、工作时长和能耗情况,为成本核算和能效优化提供原子级数据。

(2)安全预警与联动:当检测到某设备电流异常升高(可能预示电机卡滞或短路)或非工作时间异常启动时,能立即在数字孪生体中进行告警,并可联动实验室总闸,自动切断该回路电源,防止事故扩大。

(3)策略化电源控制:数字孪生系统可根据检测任务流程,通过智慧电源线向设备下发电源控制指令。例如,在样品抵达前处理功能岛前,通过指令远程唤醒并预热相关设备;在批量检测任务结束后,自动关闭非必要设备,实现绿色节能。

1.1.2 模块化前处理功能岛:前处理功能岛是基于智慧电源线和工业机器人技术,将样品前处理的多个环节(如称量、稀释、分液、萃取、涡旋、离心等)集成在一个紧凑的、模块化的自动化单元。它是对传统分散、人工操作模式的根本性变革。

(1)高度集成与自动化:功能岛内部通过机械臂、传送带和智能抓手连接各个处理工位。样品进入功能岛后,由系统调度,完成一系列标准化的前处理步骤,最大限度减少人工干预,提高效率与一致性。

(2)“即插即用”式模块化设计:每个功能岛是一个独立的智能模块。其本身通过智慧电源线接入实验室基础设施,同时其

状态数据(如机械臂位置、离心机转速、试剂余量)也通过该线路实时上传。这种设计使得实验室能力可以像“搭积木”一样灵活扩展。当检测需求变化时,可通过增加或更换功能岛模块快速调整实验室布局和能力。

(3)数据生成源头:功能岛内的每一个动作(如加样体积、离心时间)都被精确记录,成为数字孪生体中样品全生命周期数据链的源头,确保了数据的完整性和可追溯性。

(4)其他物理单元:检测设备单元、环境与设施单元、人员单元。

### 1.2 数据层

数据层负责对多源异构数据进行汇聚、治理、存储与管理。得益于智慧电源线和前处理功能岛,数据层获得了前所未有的细粒度数据源:

来自智慧电源线的设备级实时能耗与状态时序数据,包括仪器开关机状态、运行参数、故障代码、使用时长、能耗等。

来自前处理功能岛的、以样品为粒度的过程动作数据,包括样品编号、检测项目、检测方法、原始数据、中间结果、最终报告、样品位置、交接状态、前处理进度、存储条件等。

这些数据与来自环境传感器等的数据(温度、湿度、压差、洁净度、VOC浓度等)一同汇入数据池,经过治理后形成统一的数字孪生数据模型。

数据层通过构建数据湖或数据中台,利用ETL/ELT工具进行数据抽取、清洗、转换和加载,并建立统一的数据模型和数据服务接口,为上层模型提供高质量、标准化的数据供给。

### 1.3 模型层与应用层

模型层是数字孪生的“大脑”,是虚拟实验室的核心。它并非简单的三维可视化模型,而是由多学科、多物理量、多尺度的模型集合而成。

1.3.1 几何模型:利用三维建模技术(如BIM)对实验室布局、设备位置、管道线路等进行1:1高精度还原,提供直观的空间可视化。

1.3.2 物理模型:描述设备内部工作原理和物理过程的模型,例如温控系统的热力学模型、离心机的动力学模型等,用于仿真设备在特定参数下的运行状态。

1.3.3 行为模型:定义实验室实体对象的行为逻辑和规则,例如样品流转的有限状态机模型、设备调度规则模型、人员工作流模型等。

1.3.4 规则模型:嵌入业务规则和专家知识,如检测标准限值、阳性结果判定规则、生物安全应急预案等。

1.3.5 数据驱动模型:基于机器学习、深度学习算法构建的预测与优化模型,如设备故障预测模型、检测周期预测模型、资源调度优化模型等。

这些模型相互关联、相互驱动,共同构成一个能够模拟、反映、预测物理实验室状态的动态虚拟实体。

### 1.4 应用层

应用层面向实验室管理者、检测人员和决策者,提供一系列

智慧化应用服务,是数字孪生价值的最终体现。典型应用包括:

1.4.1全景可视化监控:在三维场景中实时显示样品位置、设备状态、环境参数、人员动态,实现实验室“一张图”管理。

1.4.2流程智能调度与优化:根据实时任务负荷和资源状态,动态分配检测任务,优化样品流转路径,自动调度仪器和人员,最大化吞吐量。

1.4.3预测性维护:基于设备运行数据和机器学习模型,预测关键部件的剩余寿命和故障风险,提前生成维护工单,变被动维修为主动维护,降低停机风险。

1.4.4检测过程追溯与质控:对任一检测样本,可回溯其完整的生命周期,包括谁、在何时、何地、用何设备、依据何标准、产生了何数据,实现检测质量的全程可追溯和异常自动告警。

1.4.5生物安全应急仿真:模拟病原体泄漏等突发事件,在虚拟空间中推演扩散路径、评估影响范围、测试应急预案的有效性,为实战决策提供支持。

1.4.6能力评估与预案推演:当面临新的疫情或检测需求激增时,在数字孪生体中进行“压力测试”,仿真不同策略下的检测能力、瓶颈所在,为资源规划和决策提供数据支撑。

## 2 关键技术与实现路径

### 2.1全域感知与物联网技术

本研究的核心在于,通过海科中心自主研发的智慧电源线,实现了对实验室设备能源接口的“一网通达”和全域感知,解决了传统方式中为每台设备单独部署传感器带来的成本高、兼容性差难题。结合前处理功能岛内部的精密传感器,共同构成了一个全覆盖、高可靠、低成本的实验室物联网解决方案。

### 2.2多维多尺度建模与仿真技术

多维度多尺度建模与仿真是构建高保真虚拟模型的核心。综合运用建筑信息模型(BIM)技术构建空间和设施模型,利用Unity3D/Unreal Engine或WebGL技术实现高性能渲染和交互,结合机理模型(如计算流体动力学CFD用于模拟气流组织)和数据驱动模型,构建从微观的化学反应过程到宏观的实验室运营流程的多尺度仿真能力。在几何模型和行为模型中,需要精确体现智慧电源线的布线路由和前处理功能岛的内部布局,以实现更高保真的仿真。

### 2.3数据融合与智能分析技术

智慧电源线提供的能耗数据是设备预测性维护的宝贵特征。例如,一台离心机的启动电流曲线发生微小畸变,可能预示着轴承的早期磨损。通过将这类能耗特征与设备自身的运行参数融合,可以构建出更精准、更早期的故障预测模型。

### 2.4虚实交互与协同控制技术

数字孪生的双向控制在本方案中得到极致体现。虚拟系统不仅能看到设备状态,更能通过智慧电源线这个“万能遥控器”,对绝大多数设备进行远程上电、下电、重启等基础控制。同时,对前处理功能岛,可以下发复杂的样品处理指令序列。这种控制能力使得“仿真-优化-执行”的闭环自动成为现实。

## 3 核心应用场景分析

### 3.1场景一

基于前处理功能岛与智慧电源线的样品流程极致优化。一批紧急样品送入实验室,数字孪生系统立即在虚拟空间中启动仿真:

首先,它通过智慧电源线的数据,确认目标前处理功能岛及其后续分析仪器处于待机或低功耗状态。

随后,系统通过仿真计算,为该批样品动态分配至最优的前处理功能岛,并生成处理指令序列下发。

在样品抵达前,系统通过智慧电源线远程唤醒功能岛及相关的PCR仪,使其提前预热,进入待命状态。

在三维可视化界面中,管理者可以实时看到样品在功能岛内的每一个处理步骤,以及所有相关设备的能耗状态。当功能岛处理完毕,系统自动调度机器人将样品杯转移至已预热就绪的PCR仪。该研究实现了从“样品等待资源”到“资源等待样品”的转变,将前处理与分析的间隙时间降至最低,极大缩短了TAT(样本周转时间)。

### 3.2场景二:融合多源数据的设备预测性维护

对一台位于前处理功能岛内的高离心机,数字孪生体同时监控来自设备自身的日志数据(运行周期、设定转速)和来自于智慧电源线的能耗数据(启动电流、平稳运行功率)以及来自功能岛振动传感器的数据。

AI模型分析发现,该离心机近一周的启动电流均值上升了5%,且伴有高频振动特征。系统综合判断其驱动电机存在潜在故障风险,预测其在未来50个运行周期内发生故障的概率为78%。于是,系统自动生成预警,并预约维护,同时在下一次任务调度时,避免将高强度离心任务分配至该功能岛。这种多源数据交叉验证的方式,大幅提升了预测的准确性与可靠性,实现了从“按时维护”到“按需维护”的精准跨越。

### 3.3场景三:实验室能源精细化管理与绿色运行

数字孪生系统可通过智慧电源线,对全实验室能耗进行分设备、分时段精细计量,若系统分析发现,每晚有30%的非关键设备(如普通烘箱、未工作的电脑)处于“待机功耗”状态,积少成多造成巨大浪费。基于此种情况,系统可设定节能策略,即在非工作时段,通过智慧电源线自动切断非关键设备的供电回路,此策略在虚拟环境中测试无误后,部署到物理世界。将能源管理从房间级、回路级细化到设备级,实现了科学的节能减排,每年可为实验室节省可观的电费支出。

## 4 展望与挑战

智慧电源线与前处理功能岛虽因协议兼容、接口标准化等技术集成复杂度高,初始研发部署投入大,且缺失统一行业与国家标准而推广受限,但可凭借自主技术攻坚兼容壁垒、以长期效率节能降耗收益对冲前期成本并牵头制定标准,同步把数字孪生沉淀的海量实验数据喂给AI模型,让萃取时间、温度等关键参数实现自优化,驱动智慧电源线和功能岛从单点示范跃升为行业通用范式,带动产业链协同智能化。

## 5 结论

数字孪生技术是推动海关检验检疫检测实验室迈向智慧化的核心引擎。本文创新性地将海科中心自主研发的智慧电源线与模块化前处理功能岛技术置于数字孪生架构的底层,解决了数据感知的“最后一公里”问题和自动化执行的“最初一公里”问题。智慧电源线作为实验室的“智能神经”,实现了对设备能源与状态的精准管控;前处理功能岛作为实验室的“自动化双手”,实现了样品前处理的流程再造。二者与数字孪生技术的深度融合,构建了一个感知更透彻、控制更精准、决策更智能的智慧实验室新范式。面对挑战,需要海关、科研机构和技术企业协同攻关,分阶段推进这一创新体系的落地实施,最终为守护国门安全构建一道坚实、高效、智慧的技术防线。

#### [参考文献]

- [1]戴伊娟.基于OceanConnect平台的智能电源线设计[J].通信电源技术,2022(12):省级.
- [2]Ndjiongue A R,Ferreira H C,Ouhada K. Low-complexity SOCPBFSK-00K interface between PLC and VLC channels for low

data rate transmission applications[C]//IEEE ISPLC, 2014:226-231.

[3]中国稀土集团.数字孪生管控在萃取工艺中的AI优化实践[R].2025年度社会责任报告,2025.

[4]中兴通讯.数字孪生光网络架构技术白皮书[Z].2024-1:20-25.

[5]陶飞.数字孪生十问:分析与思考[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):1-17.

#### 作者简介:

韩晶(1980—),女,北京人,毕业于西北工业大学,工学学士,中国海关科学技术研究中心高级工程师,承担信息化及网络建设工作。

#### \*通讯作者:

秦士忠(1968—),男,学士,高级工程师,主要从事海关科技管理和实验室管理研究方向。