

# 数字孪生技术在电厂应急演练与安全培训中的应用研究

苟雁春 祁海兵 孙钰林

内蒙古京能检修工程管理有限公司 内蒙古 乌兰察布 012000

**摘 要:** 电厂生产涉及高温高压、易燃易爆等高危因素,应急演练与安全培训是保障人员安全和机组稳定运行的关键手段。数字孪生技术通过构建电厂高保真虚拟镜像,为应急演练提供可重复、可交互、可评估的仿真环境。本文梳理了数字孪生技术体系与电厂安全管理理论,分析了当前培训痛点与孪生应用需求,设计了涵盖物理建模、场景构建、推演引擎和交互机制的系统架构,并探讨了高保真可视化、虚实数据同步、AI 导调和分布式协同等关键技术。研究表明,数字孪生技术能够有效提升电厂应急培训的沉浸性、覆盖面和量化评估水平。

**关键词:** 数字孪生; 电厂安全; 应急演练; 安全培训

**引言:** 电厂生产环境复杂、危险源密集,运行人员应急响应能力直接关系事故后果。长期以来,安全培训主要依赖课堂讲授和定期实战演习,理论教学难以转化为真实的应急反应,实战演练受限于场地、安全和经费,复杂事故场景几乎无法真实模拟,一旦发生事故往往因准备不足导致处置失当。本文探讨数字孪生在电厂应急演练与安全培训中的系统架构与关键技术,以期为电厂安全培训数字化转型提供参考。

## 1 数字孪生技术与电厂安全管理的基础理论

### 1.1 数字孪生技术体系

数字孪生通过数据驱动和模型融合,在虚拟空间构建物理实体全生命周期数字化镜像,实现物理与信息的双向映射与实时交互。技术体系涵盖数据采集传输、三维建模可视化、仿真建模、数据分析与 AI 及模型更新闭环等环节。数据采集层通过传感器获取运行参数,三维建模层利用 BIM 和激光扫描构建几何模型,仿真建模层融合机理与数据驱动模型复现实体行为。数字孪生成熟度从数化、互动、先知、先觉到共智逐级递进,表征系统从静态呈现向智能决策的演化。目前,数字孪生在电力设备监测和运维领域已有探索,在人员培训场景中的系统化应用尚处起步阶段。

### 1.2 电厂安全管理的理论基础

电厂安全管理以事故致因和应急管理理论为支撑。海因里希法则揭示事故比例关系,强调消除未遂事件的预防价值;瑞士奶酪模型将事故归因于多层防护同时漏洞,提示需构建纵深防御;轨迹交叉理论指出事故是人的不安全行为与物不安全状态时空交叉的结果。应急管理

将突发事件应对划分为预防、准备、响应、恢复四阶段,准备阶段核心正是应急培训与演练<sup>[1]</sup>。电厂风险涵盖火灾爆炸、泄漏中毒、设备损坏、误操作和自然灾害等,应急预案由综合预案、专项预案和现场处置方案构成三级架构,上述理论为数字孪生培训系统功能设计提供了明确指导。

### 1.3 数字孪生赋能电厂安全培训的理论逻辑

数字孪生赋能电厂安全培训可从学习理论和认知规律加以理解。沉浸式学习理论指出,高度仿真情境中的体验和记忆远比被动听讲深刻,临场感是知识内化为能力的关键。情境认知理论强调知识与情境不可分离,真实工作场景才能有效激活既有经验并促进知识迁移。数字孪生通过高精度建模和实时数据驱动,营造与物理电厂高度一致的视觉环境和物理逻辑,使学员在虚拟空间完成事故识别、应急决策和操作执行的全过程训练。演练结束后系统回放操作轨迹、复盘处置得失,实现了从“讲授—记忆”到“模拟—体验—反思”的培训模式跃迁。

## 2 电厂应急演练与安全培训现状及需求分析

### 2.1 典型电厂安全风险与应急预案体系

电厂生产中,煤粉自燃爆炸、锅炉爆管、汽轮机超速断轴、变压器火灾、氢气泄漏爆炸、化学药品中毒等事故类型各异且后果严重。基于历史事故统计和危险与可操作性分析,电厂需系统识别事故场景并评估其概率与后果等级。应急预案按综合预案、专项预案和现场处置方案三级架构编制:综合预案明确应急组织体系和工作原则,专项预案针对火灾、人身伤亡等制定专项流程,现场处置方案细化到岗位操作步骤。尽管预案文本

齐全,但其可操作性和人员熟悉程度依赖于反复演练与持续改进,仅靠桌面推演和纸面学习难以将文字要求转化为本能反应,迫切需要更加高效逼真的训练手段。

## 2.2 电厂安全培训体系现状

当前电厂安全培训以入场三级安全教育、年度再培训、专项技能培训和定期应急演练为主要形式。入场教育面向新员工和外来人员,侧重法规厂纪和基本风险告知;年度再培训侧重规程复习和案例学习;专项培训针对特殊作业持证和复审;应急演练每年组织若干次,涵盖消防、急救、疏散等科目。培训方式上,课堂讲授和视频教学占大部分学时,桌面推演和实战演习比重较小。考核以理论考试为主,实操考核覆盖面有限。多数电厂建有仿真培训室,但以设备操作仿真为主,应急演练功能不突出。总体而言,培训的系统性和针对性有待加强,效果量化评估手段明显不足。

## 2.3 数字孪生应用需求分析

功能需求方面,数字孪生系统应具备场景三维可视化、事故演化动态模拟、人员操作实时响应和效果自动评估等核心能力,学员以第一人称视角漫游并处置事故,系统根据操作正确性和时效性反馈进展。性能需求方面,须保证画面渲染流畅和物理仿真真实,多用户并发时通信延迟不得影响协同体验,数据存储和回放应支撑完整复盘分析<sup>[2]</sup>。用户需求方面,管理者关注培训覆盖率与投入产出比,培训专工关注配置灵活性与评估细致度,一线人员关注操作真实感。需求分析结论要求系统具备场景可配置、过程可交互、结果可量化三大基本特征。

# 3 电厂应急演练数字孪生系统架构设计

## 3.1 总体架构设计

系统总体架构采用五层分层设计,自下而上依次为数据感知层、数据传输层、数字孪生层、应用服务层和用户交互层。数据感知层通过 DCS/SCADA 系统接口、传感器网络和人工输入获取电厂实时运行数据和环境参数;数据传输层依托工业以太网和 5G 专网实现高带宽低延迟的数据流通;数字孪生层是系统的核心,集成了三维几何模型、设备机理模型、事故演化模型和人员行为模型,构建完整的虚拟电厂镜像;应用服务层封装了场景管理、演练推演、行为监测、评估分析和知识库管理等业务功能模块;用户交互层提供 PC 端、VR 头显、移动终端等多种访问方式。系统业务流程包括预案导入、场景配置、演练执行、数据采集、评估反馈和改进跟踪六个环节,形成完整的培训闭环。

## 3.2 物理电厂数字化建模

物理电厂的数字化建模是数字孪生系统的基础工程。三维几何建模采用 BIM 设计图纸、三维激光扫描和倾斜摄影相结合的方式,对电厂主厂房、锅炉汽机辅机设备、电气系统、管道阀门、控制室等全场景进行高精度几何重建,模型精度需达到结构尺寸准确、材质表现真实、设备细节可辨的水平。设备机理模型针对锅炉燃烧、汽机做功、电气传输等关键过程建立热力学、流体力学和电气原理方程驱动的数学模型,确保虚拟设备的运行参数变化符合物理规律。DCS/SCADA 系统实时数据的接入使虚拟电厂能够同步反映真实机组的运行状态,为演练场景提供真实的初始工况。模型轻量化处理是保障系统运行流畅度的关键,通过多边形简化、纹理压缩、实例化渲染等手段,在保证视觉效果的前提下最大限度地降低计算资源消耗。

## 3.3 应急场景构建与推演引擎

应急场景构建与推演引擎是数字孪生演练系统的核心驱动部件。场景构建模块支持演练设计人员通过参数化配置方式快速生成各类事故场景,包括事故类型选择(火灾、泄漏、设备故障、误操作等)、发生位置设定、事故规模与严重程度调节、环境条件(风速、温度、能见度等)设置。事故演化仿真模型基于计算流体力学和数值分析方法,模拟火灾烟气扩散、气体泄漏迁移、爆炸冲击波传播等物理过程,使事故发展态势随时间和处置行为动态变化。应急处置响应模型内置标准操作规程和专家决策逻辑,对学员的每步操作进行实时判定,并驱动事故态势向相应方向演化<sup>[3]</sup>。推演引擎按照“事件触发→态势演化→响应决策→结果反馈”的闭环逻辑运行,确保每次演练都是一次独特而真实的应急经历,克服了传统演练脚本固定的局限。

## 3.4 人员行为建模与交互机制

人员行为建模与交互机制决定了学员在虚拟环境中的参与感和训练有效性。操作员行为建模为不同岗位角色设定标准操作路径和允许偏差范围,系统在演练过程中实时记录学员的移动轨迹、操作序列、响应时间和沟通行为,并与预设的标准程序进行对比分析。多人协同演练功能支持值长、主操、巡检、外委人员等多角色同时进入同一虚拟场景,各自执行岗位职责范围内的应急操作,系统记录各角色的动作时序和配合情况,检验团队协作应急能力。VR 沉浸式交互接口通过头显设备和动作捕捉手柄,使学员在虚拟环境中获得 360 度视野和自然操作体验。语音识别功能支持学员通过语音下达操作

指令, 系统进行语义识别并驱动虚拟角色执行, 使交互更加贴近真实工作习惯。

#### 4 数字孪生培训系统的关键技术

##### 4.1 高保真三维可视化技术

高保真三维可视化是构建沉浸式培训体验的技术基础。电厂场景具有设备密集、管线复杂、空间尺度大的特点, 给实时渲染带来巨大压力。面向培训需求的渲染优化策略包括: 基于视觉重要性的分层渲染, 对学员视线聚焦区域采用高精度渲染, 外围场景适当降低细节; 动态细节层次技术根据视点距离自动切换模型的精细程度; 实例化渲染批量处理大量重复几何体。粒子系统用于模拟火灾火焰、烟气扩散、蒸汽泄漏、喷水喷雾等动态特效, 通过调整粒子数量、速度、颜色和生命周期参数, 呈现不同事故场景的视觉特征。第一人称视角下学员可自由漫游, 第三人称视角便于教官观察整体态势。视觉真实感直接决定学员的临场感和投入度, 是衡量系统实用性的首要指标。

##### 4.2 虚实融合的数据同步技术

虚实融合的数据同步技术确保数字孪生体与物理实体之间信息的一致性和实时性。实时数据接入方面, 通过工业标准通信协议从 DCS 和 SCADA 系统读取机组负荷、温度、压力、流量、开关状态等运行参数, 经数据清洗和校验后注入数字孪生体, 使虚拟电厂同步呈现与实际机组一致的初始工况。历史事故数据回放功能将过去发生的真实事故记录重构为三维可视化场景, 作为案例教学的生动素材。在演练过程中, 学员的操作指令经系统解析后驱动虚拟设备和环境状态发生变化, 变化结果同时被记录为评估数据。数据同步的时效性直接关系到演练体验的连贯性和评估结果的真实性, 要求端到端延迟控制在可感知阈值以内。同步机制还须具备断网续传和数据缓存能力, 保证网络波动时系统仍能稳定运行<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 基于 AI 的智能导调技术

基于 AI 的智能导调技术使演练系统具备了自适应和智能化特征。演练脚本自动生成模块基于历史事故案例库和应急预案数据库, 利用自然语言处理和案例推理技术, 自动合成符合逻辑的演练剧情文本, 包括初始条件设置、事故触发方式、关键决策点和预期处置路径。智能 NPC 行为模拟为非玩家角色 (如模拟运行的班组成员、消防队、医务人员等) 赋予自主行动能力, 在演练中根据主角操作做出合理的配合或反馈, 使虚拟场景中的角色行为更加自然逼真。基于强化学习的应急决策辅

助功能, 能够在学员操作偏离正确方向时, 以提示方式给予引导, 或在演练结束后提供基于最优策略的改进建议。AI 技术的引入使系统从固定脚本的执行工具升级为具备自适应能力的智能训练伙伴。

##### 4.4 分布式协同技术

分布式协同技术支持多终端、多岗位、跨地域的联合演练。系统架构采用客户端-服务器模式, 演练数据集中存储于服务器端, 各终端通过标准通信协议与服务器进行数据交换。PC 端作为主要的演练设计和教官控制平台, 提供完整的场景配置、过程监控和评估分析功能; VR 终端为学员提供沉浸式操作体验; 移动端 APP 支持现场人员利用碎片化时间完成安全知识学习和轻量级应急推演。针对多岗位异地协同演练的需求, 系统设计了状态同步机制, 确保各终端显示的虚拟场景状态保持严格一致。大规模并发用户场景下, 采用服务器集群和负载均衡技术保障系统响应速度。分布式协同能力使电厂无需集中大量人员即可开展常态化应急训练, 培训的组织成本和参与门槛显著降低。

#### 结束语

电厂应急演练与安全培训是保障安全生产的最后一道防线, 传统方式在沉浸性、覆盖面和效率上的不足, 制约了人员应急能力的实质性提升。数字孪生技术通过构建物理电厂的虚拟镜像, 为应急培训开辟了全新的技术路径。本文从理论基础、现状需求、架构设计和关键技术四个层面, 系统探讨了数字孪生在电厂应急演练与安全培训中的应用方案, 构建了涵盖物理建模、场景推演和交互评估的完整技术框架。随着数字孪生成熟度从数化向共智持续跃升, 以及生成式 AI、云渲染等技术的深度融合, 数字孪生培训系统将逐步实现演练剧本的自动生成、学员行为的自适应引导以及培训效果的数据化评估, 在电厂安全培训领域发挥更加关键的作用。

#### 参考文献

- [1] 王超, 刘兵. 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用 [J]. 东北电力技术, 2025, 46(1): 5-8.
- [2] 周文武, 付兴, 周中天, 等. 多角色交互式电厂应急演练系统在培训效能提升中的实践 [J]. 数字化用户, 2025(49): 13-15.
- [3] 沈炳. 城市数字孪生技术研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(9): 22-25.
- [4] 杜玉雪, 朱国良. 数字孪生技术人才培养探索 [J]. 中国仪器仪表, 2024(1): 21-25.