

[数字孪生]

面向虚拟巡检的数字孪生可视分析系统

文/卫乾¹ 杜秋明¹ 马凯蒂¹ 林轶² 陈逸飞²

1. 昆仑数智科技有限责任公司; 2. 杭州电子科技大学人文艺术与数字媒体学院

提出基于数字孪生技术的智能巡检方法，结合路网构建、时序数据预测和智能路由等算法，以智能化的方式模拟用户在真实巡检场景中的设备故障应急处理措施，并开发设计了一款数字孪生智能巡检编辑器，帮助用户快速搭建面向智能巡检的仿真应用场景，从而提高巡检的真实性和有效性。

当下，在云计算、物联网和人工智能等新一代信息技术的驱动下，以数字化为基础的数字经济已经成为新时代众多领域发展的趋势，面对新时代的挑战，加快新一代信息技术与行业的深度融合已是必由之路和共识。尤其是人工智能、大数据和数字孪生等新兴技术与各产业的深度融合，将有力地推动各产业数字化、智能化的发展进程，成为我国经济社会发展变革的强大动力。

随着经济的不断发展，人们对油气的需求日益增多，为了保证油田的稳定生产，巡检是必不可少的重要环节。目前，企业主要采用人工巡检与监控技术相结合的方式，由站内工作人员定期检查设备损坏以及管道泄漏情况。然而，人工巡检方式劳动强度较大但工作效率却很低。视频监控系统也有很多不足之处，例如，很难实现全方位覆盖从而存在盲区。除此之外，巡检场景大都存在着设备数量多、分布广泛的特点，高频、高危操作带来高成本的同时，人员安全、漏检和错检等不确定性因素为巡检工作带来更多挑战。现场人员无法实时查看全局设备运行情况，在重要区域的设备运维过程中，高度依赖现场人员的相关技术知识和经验，运维人员需要往返于控制中台和现场，运维效率亟待提升。而在具体检修和故障排查时，现场人员往往无法快

速、准确地定位和洞察故障设备的运行状态以及相关数据信息，很容易出现排查不彻底的情况，更为突发情况的应急处理埋下隐患。

利用数字孪生技术快速地获取现场运行数据并组建虚拟的工作场景，通过运行数据的挖掘分析进行故障信息的预警和诊断，能够实现巡检质量与效率的快速提升。因此，基于数字孪生技术的虚拟巡检，不仅能够对设备进行动态监测、故障预判和及时维修，还可以实现远程操控，从而极大降低运营成本，提高设备安全性。

然而，目前市面上存在的数字孪生巡检系统普遍存在局限性。例如，故障模型与实际场景相比严重不符，虚拟巡检员只能机械式地沿着指定路线行走，无法进行智能漫游。且这些模型中的虚拟巡检员并不智能，只能发现在一定范围内出现问题的设备，若距离较远的设备出现问题，该虚拟巡检员则无法察觉。只有当虚拟巡检员在行进路线和行进方向上观测到某设备发生故障时，系统才会对故障进行模拟，指引虚拟巡检人员进行故障上报和处理。因此，在当前虚拟巡检的场景中，虚拟巡检员不是拟人化的智能体，和真实场景相比差异较大，不利于巡检人员的巡检培训和操作仿真教学。为了解决以上问题，本文提出基于数字孪生技术的智能巡检

方法。

相关工作

1. 数字孪生在工业生产中的应用

数字孪生技术在各个行业已广泛应用，例如在高端工业制造的智能辅助应用，黄昂等^[1]使用 FOCKE701 技术高速包装机组首例便携式智能运维平台的功能设计，实现零部件模型仿真和增强现实系统功能，完成了“三维运维，可视化管理，虚拟装配”平台目标；外国科学家 Glaessgen 等^[2]在数字孪生技术的支持下实现了减轻未来几代 NASA 和美国空军飞行器的重量目标，同时在比现在一代更长的时间内承受更高的负载和更极端的服务条件；数字孪生技术也为物理对象的数字化建模和交互控制形成有效的管理模式和技术框架提供帮助，实现了从数字孪生动画、工艺流程图、驾驶舱三个维度对传动设备多个传感数据进行可视化展示^[3]。陆清等^[4]在飞机架构模型设计、多模型架构集成以及模型参数辨识和验证几个方面，对数字孪生技术在飞机设计验证过程中的应用技术进行了探讨；郭亮等^[5]利用数字孪生的基本概念，综述了其在航空航天、产品、制造设备及制造车间等阶段的应用进展，重点分析了数字孪生与物联网、大数据、CPS 之间的联系与区别，最后指出了数字孪生在制造领域的发展趋势；而 Zhang 等^[6]在他们的文章中也介绍了在工业 4.0 背景下数字孪生技术的概念，并结合 Hatch 的应用实践提出了高炉数字孪生系统的建立和实施方法。

2. 虚拟巡检

数字孪生技术在虚拟巡检也应用广泛。为了更快地井下变电，人们设计了巡检机器人，并采用虚幻引擎 UE4 作为开发工具，借助 UE4 的编程语言-蓝图，设计了一种基于 UE4 的煤矿井下变电所

巡检机器人数字孪生系统，此设计可以远程控制巡检机器人完成定点，自动巡检，三维显示巡检环境，接收巡检采集的数据以及对数据进行分析与显示^[7]；在飞机装配方面也有虚拟巡检的身影，通过数字孪生系统物理层和模型层的双向数据传输，实现机器人相机朝向的实时优化和虚实机器人的状态同步，获取待检测区域的真实图像和标准数模图像，通过虚实图像对比获取检测结果，并使用多种可视化手段将检测结果回馈给现场工人^[8]；数字孪生技术还在多终端工业设备巡检监控系统及方法中有所体现，其中包括物理实体模块，可视交互、数据计算模块，数据传输与反馈驱动模块^[9]；在变电站中，智能巡检可以帮助员工及时掌握变电站的最新运行状态和潜在的安全隐患，有效保护变电站的运行安全，利用数字孪生系统能够反映变电站设备运行实时状态^[10]；李志强等在阐述数字孪生体系变电站的融合巡检方式时表示，智能巡检在一定程度上优化巡检人员作业操作任务，提高设备巡检精准性及可追溯性^[11]；专家梁亚成等^[12]也表示，隧道智能巡检机器人作为隧道巡检数据采集手段，有助于建设基于数字孪生技术的基础设施智能化管理平台，虚拟巡检技术还能增强现实三维跟踪模块、显示输出模块、故障特征信息提取与匹配模块和故障智能巡检模块的功能，通过系统硬件与软件的设计，实现了基于增强现实的设备运行故障智能巡检系统的运行；国外专家 Hedberg 等^[13]提出传统的软件检查已经不适合现代分布式软件工程项目，于是引入了虚拟软件检查的概念来解决这个问题。

系统概述

此编辑器基于 WebGL 进行开发，以期通过三维模型进行编辑处理，实现数字孪生三维场景的构



建，达到设备智能管理、智能巡检与预警的目的，提升企业数字化建设效率，流程如图1所示。

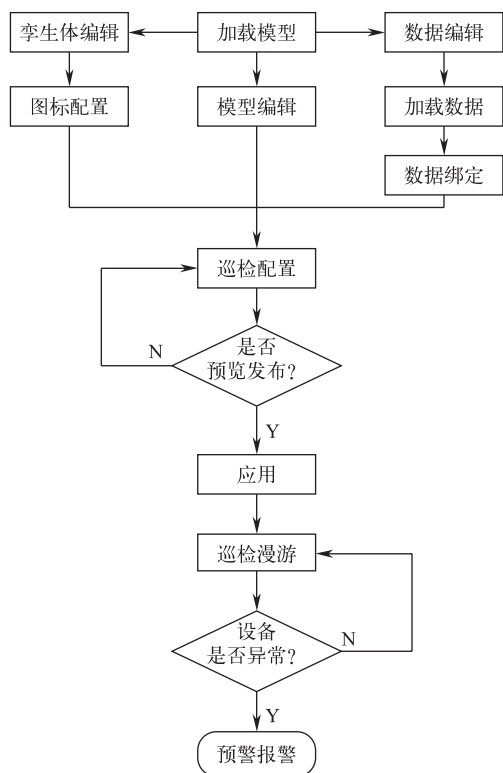


图1 系统流程图

模型管理模块主要管理数字孪生场景构建过程中的三维模型，主要包括基本模型库、通用模型库和专业领域模型库，能够实现上述模型的拖、增、删、查功能，并对每种模型库进行分类。在数据管理方面，编辑器获取设备的运行数据之后，会根据数据特性进行分类存储，并能够支持数据的增、查、绑定操作。

插件管理模块主要管理数字孪生场景构建过程中的各类插件，如图表组件、天气效果和粒子效果等，让数字孪生场景的构建更加丰富多样、数据的展示更加直观，各类插件支持拖、增、查功能。

智能巡检模块主要对设备的运行状态进行检测，以实现设备异常时，发出预警的功能。此模块有两种判断预警的方式：①由系统自动判断；②由用户设定阈值。

智能巡检模型

1. 路网构建

为了更好完成智能巡检的路线规划，需要把工

业模型中的道路信息转化成网络结构，构建出道路网络图，其中包括边、节点及其他设备。

首先，把一个路口定义成一个节点，如果两个路口中有道路相通则加一条边，再把模型中的路串联成网络结构，并对其中的设备进行标注，形成路网图。

道路网络作为智能巡检发展的重要基础条件，不仅需要交叉口与路段来表达几何与拓扑信息，而且需要其中的机械或厂房信息来承载道路连接语义，从而支撑人工智能巡检在道路网络中的有序流动。

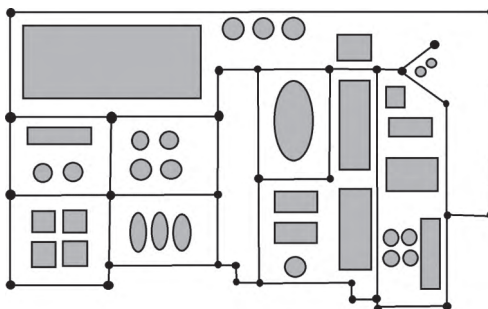
如图2所示，用户在加载三维模型图后，平台自动在工业模型图上标注出路线，并构建出路网，把模型中的道路信息抽象成网络结构，形成平面的路网图。



(a) 工业模型图



(b) 基于该图构建路网



(c) 路网构建结果

图2 路网构建图

2. 故障检测

在路网构建成功之后，需要对设备实现智能的故障检测。基于设备实时产生的数据，使用时间序列预测模型在历史数据的基础上进行预测，以智能、高效地发现和处理疑似故障。

本文采用ARIMA模型进行时间序列预测，全称为自回归移动平均模型（Autoregressive Integrated Moving Average Model, ARIMA），是统计模型中最常见的一种用来进行时间序列预测的模型。

ARIMA模型有 p 、 d 、 q 三个参数。

p 是预测模型中采用的时序数据本身的滞后数（lags），为AR/Auto-Regressive项。

d 是时序数据需要进行几阶差分，才是稳定的，为Integrated项。

q 是预测模型中采用的预测误差的滞后数（lags），为MA/Moving Average项。

假设 y 表示 t 时刻 Y 的差分

$$\begin{aligned} \text{if } d=0, y_t &= Y_t \\ \text{if } d=1, y_t &= Y_t - Y_{t-1} \\ \text{if } d=2, y_t &= (Y_t - Y_{t-1}) = (Y_{t-1} - Y_{t-2}) \\ &= Y_t - 2Y_{t-1} + Y_{t-2} \end{aligned}$$

ARIMA的预测模型可以表示为

Y 的预测值 = 常量 c and/or 一个或多个最近时间的 Y 的加权和and/or一个或多个最近时间的预测误差。

假设 p 、 q 、 d 已知，ARIMA用数学形式表示为

$$\hat{y}_t = \mu + \phi_1 y_{t-1} + \cdots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 e_{t-1} + \cdots + \theta_q e_{t-q}$$

式中， ϕ 表示AR的系数； θ 表示MA的系数。

使用该模型，给出一个时间序列，就可以根据历史周期预测出下一个时段的价值会到哪里，也就是可以根据输入设备的历史数据，例如瓶罐的温度、压力和压强等数据，推测出下一时段的数据值。

对比以往的虚拟巡检，都是根据人工检测的值去判断设备是否正常，但该模型只需上传底层数据，就可以做预测，进一步智能判断工业设备是否正常，并提前给出相应的红色或黄色预警。

3. 最短路由

工业设备往往需要高强度高水平的运作，因此出现故障时，需要第一时间紧急处理。以往的智能巡检，大多都是设定一条路径，巡检设备在该路径上反复行走，但这样不仅效率低下，并且无法对突

发情况做出及时的反应。

而本文中的智能巡检会在工业设备出现故障时发出相应警报，或者智能预测模型预测到设备存在隐患时，自动在路网上寻找到最短路径，以最快的方式到达故障点，以便及时解决问题。如图3所示，当设备出现烟雾报警时，模型会基于虚拟巡检人员位置和故障点进行智能路径匹配计算，规划出最短路径。在图3中，蓝色虚线箭头代表预先设定的路径，它指导着虚拟巡检人员在正常情况下的巡检路线。然而，当模型检测到设备故障后，它会立即生成一条新的最短路径，以引导虚拟巡检人员前往故障点。这条路径通过黄色箭头表示，它是根据故障点的位置和虚拟巡检人员的实时位置计算得出的。这样，系统能够在发现故障后快速规划出最短路径，以便虚拟巡检人员能够迅速抵达故障点进行处理和维修。当巡检人员抵达故障点时，系统会将当前事件主动上报至总平台进行记录汇总。

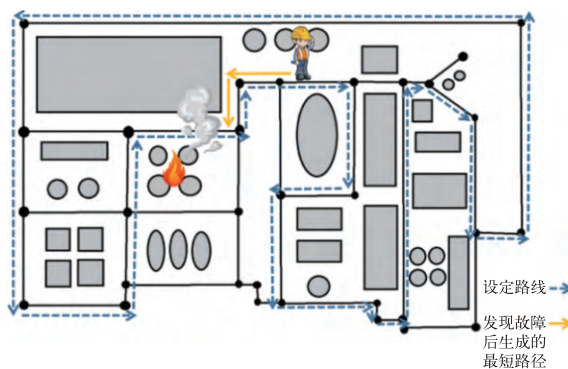


图3 最短路由图

4. 技术实现

数字孪生油气项目的运用主要基于WebGL和threejs进行数字孪生编辑器。在编辑方面主要分为三块：三维场景编辑、数据业务编辑和智能巡检编辑。三维场景编辑主要是调用多种接口以支持多种格式模型来导入，根据用户的具体操作，对模型进行相应的解耦、组合、缩放、平移和旋转等操作，在修改纹理材质时，将选中的纹理贴图贴在三维模型上，再将选中的特效附着在所选中的模型上渲染。数据业务编辑支持像Oracle、MySQL、MS SQL Server等关系型数据库，以及非关系型数据库MongoDB中读取设备数据（如csv、xlsx等表格文件）的读取。它会将所选中的数据作为一个

属性绑定到所选中的一个或一类的模型上；然后调用echarts图表库，选择其中一个图表，再读取模型绑定的数据，然后绘制图表，实现数据的展示。智能巡检编辑则会根据用户具体操作，对摄像机进行相应的移动，实现用户自由游览场景，然后利用随机游走算法，系统自动在场景中巡检，同时利用图算法提取场景中的路网信息，再由用户指定游走路径。

设备在检测到错误时会开启智能预警。智能预警是由用户设定设备异常阈值，若系统发现有设备转态超过此阈值，则报警，同时也可以利用数据分析算法，对设备的历史数据和当前数据进行分析，以预测设备发生异常的概率。

案例分析

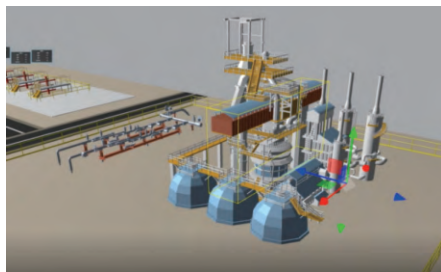
1. 虚拟巡检定制

首先，用户从系统模型库中选中要加载的模型，通过拖拽设备、厂房和道路等模型并对其进行旋转、缩放和移动等功能，在界面中构造出一个与真实油气生产企业基本一致的三维虚拟场景，并在此场景中进行巡检的定制，如图4所示。

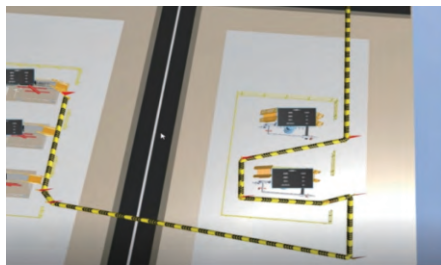
搭建完后，进行巡检路线的构建。用户可以通过鼠标点选，在场景中选出一个个路网点（以旗子的形式呈现，如图4b所示），系统会自动将这些路网点连接成路径，在用户选完所有路网点，进行路径保存后，系统就会将该路径保存在系统中，默认第一条路径为路径1。

同时，系统中也加载了数据库功能，支持用户通过数据接口导入外部数据（如mysql，API等类型）至设备中，也支持用户直接选用本地数据库中的数据，为设备配置可视化图表（折线图、柱状图等），或是将某一设备的监控视频加载到该设备附件，同时也接受一些底层的传感器数据导入至设备（如图4c、图4d所示）。当虚拟巡检员巡检时，在巡检员一定范围内的设备图表会自动显示，超出该范围时，该设备图表就不会显示在系统界面中，该范围也由用户在巡检员巡检前自行选择。

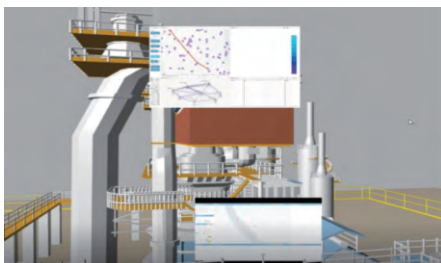
最后，在预览界面中选择巡检人员，巡检路径及图表的显示范围，巡检人员便会沿着路径开始巡检，同时，界面中也有着停止按钮可以使用户在需要虚拟巡检员停下时停止巡检。



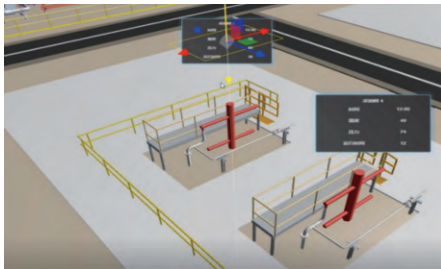
(a) 油气生产场景定制



(b) 巡检路线定制



(c) 视频加载



(d) 图表配置

图4 巡检场景定制

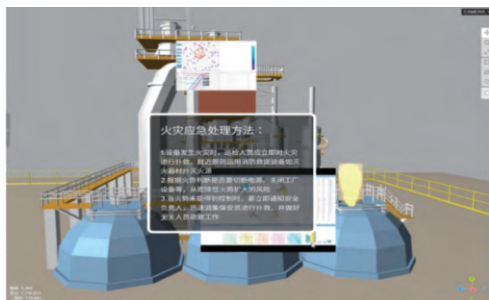
2. 智能巡检

系统根据时序预测模型和设备绑定的数据，进行设备故障预警。当某设备温度发生异常，烟雾等粒子效果可以叠加显示在相应设备上。此时，巡检员将第一时间停止当前的巡检，同时系统为其规划出当前最近故障点的最短路线，如图5所示。当巡检员走至故障点附近时，系统会自动弹出一些规章方法来指导用户处理该故障（规章方法均来自于用户手册中的章程）（如图5b所示）。处理完该故

障后,若仍有故障警告未解决,则系统处理方法同上;若所有故障已被解决,则巡检员将回至刚才脱离巡游的点继续进行路径巡游。



(a) 赶往预警事故



(b) 应急处理方案

图5 智能巡检动画效果

结束语

本文提出基于数字孪生技术的智能巡检方法,结合路网构建、时序数据预测和智能路由等算法,以智能化的方式模拟用户在真实巡检场景中的设备故障应急处理措施,并开发设计了一款数字孪生智能巡检编辑器,帮助用户快速搭建面向智能巡检的仿真应用场景,从而提高巡检的真实性和有效性。用户可以在系统中设定巡检路线,虚拟巡检员默认沿着该指定路径进行巡检。当在巡检过程中某设备发生故障,系统会通过烟雾和声音等特效进行示警,而虚拟巡检员会在第一时间脱离指定路线快速赶往事发地进行故障处理和上报。因此,本文开发的面向智能巡检的数字孪生编辑器,可以辅助用户实现巡检路线定制、虚拟巡检员智能化巡检、设备故障自动报警和处置等功能。大量实验结果进一步验证了本文系统工具的有效性和实用性。EA

(收稿日期:2023-11-07)

参考文献

- [1] Glaessgen E, Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles[C]// Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics & Materials Conference Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference Aiaa. 2012.
- [2] 谷丰, 罗啸, 邵啸. 数字孪生在工业安全生产中的应用分析[J]. 专用汽车, 2022(9): 15-17.
- [3] 陆清, 吴双, 赵喆, 等. 数字孪生技术在飞机设计验证中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(3): 1-8.
- [4] 郭亮, 张煜. 数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 390-398.
- [5] Yale Zhang, Ian Cameron, Mitren Sukhram, 等. 高炉数字孪生系统的建立与应用实践[C]. 2019年全国高炉炼铁学术年会摘要集, 2019.
- [6] 李新, 李飞, 方世巍, 等. 基于UE4的井下变电所巡检机器人数字孪生系统[J]. 煤矿安全, 2021, 52(11): 130-133.
- [7] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 981-989.
- [8] 张燕龙, 郭磊, 陈亮希, 等. 基于数字孪生技术的多终端工业设备巡检监控系统及方法: CN111176245A[P]. 2020.
- [9] 王耿祥, 桑小兵, 曹宜安, 等. 数字孪生技术在变电站智能巡检中的应用[J]. 电力设备管理, 2022(5): 11-13.
- [10] 李志强, 丁小蔚, 杜王特. 基于数字孪生体系变电站融合巡检方式研究[J]. 电子技术(上海), 2022, 51(4): 38-41.
- [11] 梁亚成, 虞赛君, 马迪迪, 等. 基于数字孪生的隧道智能巡检技术研究与应用[J]. 北京测绘, 2022, 36(7): 870-874.
- [12] 刘惠灵, 邓传华, 邵彦宁. 基于增强现实的设备运行故障智能巡检系统[J]. 电子设计工程, 2020, 28(15): 124-128.