

系统仿真学报  
*Journal of System Simulation*  
ISSN 1004-731X, CN 11-3092/V

## 《系统仿真学报》网络首发论文

题目: 光纤二次套塑车间数字孪生系统的构建与应用  
作者: 袁标, 黄友锐, 徐善永, 荣雪  
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0568  
网络首发日期: 2022-08-22  
引用格式: 袁标, 黄友锐, 徐善永, 荣雪. 光纤二次套塑车间数字孪生系统的构建与应用[J/OL]. 系统仿真学报. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0568>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 光纤二次套塑车间数字孪生系统的构建与应用

袁标，黄友锐\*，徐善永，荣雪

(安徽理工大学 电气与信息工程学院，安徽 淮南 232001)

**摘要：**为解决目前光纤二次套塑车间智能化、数字化程度低的问题，提出基于数字孪生(Digital twins, DT)的光纤二次套塑车间三维可视化监控与故障诊断的方法。面向光纤二次套塑车间设备，结合车间生产工艺和设备运行机理，对光纤二次套塑车间进行全物理属性的数字化建模，构建虚拟孪生场景。通过数据的交互传递实现虚拟车间和物理车间的实时映射，虚实交互可以实现对光纤二次套塑车间设备可视化、智能化操控。通过建立 Unity3D 与 MySQL 数据库的连接，对孪生数据进行存储。最后以某光纤二次套塑车间为应用对象，设计并开发了光纤二次套塑车间数字孪生系统，验证了所提方法的有效性。

**关键词：**数字孪生；光纤二次套塑车间；3D 建模；可视化监控；故障诊断

中图分类号：TP391.9

文献标志码：A

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0568

## Construction and Application of Digital Twin System for Optical Fiber Secondary Coating Workshop

YUAN Biao, HUANG Yourui\*, XU Shanyong, RONG Xue

(Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the current optical fiber secondary coating workshop has inferior intelligent and digitalized degree, a method of 3D visual monitoring and fault diagnosis of optical fiber secondary coating workshop based on Digital twins (DT) is proposed. Aiming at the equipment of optical fiber secondary coating workshop, combined with the workshop production process and equipment operation mechanism, the digital modeling of all physical properties of optical fiber secondary coating workshop was carried out, and the virtual twin scene was constructed. Real-time mapping between the virtual workshop and the physical workshop is realized through the interactive transmission of data, and the virtual-real interaction can realize the visualization and intelligent control of the equipment in the optical fiber secondary coating workshop. By establishing the connection between Unity3D and MySQL database, the twin data is stored. Finally, the digital twin system of a fiber secondary coating workshop is designed and developed, and the effectiveness of the proposed method is verified.

**Keywords:** digital twins; optical fiber secondary coating workshop; 3D modeling; visual monitoring; fault diagnosis

基金项目：国家自然科学基金(61772033)；安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院研发专项基金(ALW2021YF03)

第一作者：袁标(1995-)，男，硕士生，研究方向为数字孪生技术、智能制造。E-mail: 2540734658@qq.com;

通讯作者：黄友锐(1971-)，男，教授，博导，研究方向为数字孪生、智能优化算法等。E-mail: hyr628@163.com

## 引言

随着新一代信息技术的发展,工业制造车间向数字化和智能化转型也不断向前推进。尤其是近年来数字孪生技术的飞速发展,为工业制造车间向智能车间转换提供了有力的支持。数字孪生是 2003 年 Michael Grieves 教授在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上首次提出<sup>[1]</sup>,数字孪生技术是连接物理世界与虚拟孪生世界的桥梁,通过在虚拟世界构建物体的三维仿真模型<sup>[2]</sup>(物理模型、几何模型、规则模型、行为模型)来映射物理世界的真实物体,实现工业制造车间的三维可视化监控和车间设备的故障诊断等功能。

近几年,随着我国通信行业大力发展,以及 5G 技术的飞速普及,我国对光缆产品的需求量以及光缆制造的质量都有了新的要求。光缆制造是我国十分重要的制造领域之一。因此,对光缆制造车间提出技术更新十分必要,国内外相关技术人员对此进行了研究,杨宇霆<sup>[3]</sup>对光纤并带机的电气控制系统提出了技术升级,汪鹏<sup>[4]</sup>基于 MATLAB 中 GUI 模块开发了一个光缆制造生产过程的调度仿真平台,可以对光缆制造车间的生产调度模型进行可视化仿真。秦志伟<sup>[5]</sup>搭建了基于物联网的光缆制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES),该系统可以对光缆车间设备信息和订单进行管理,但是现阶段,光缆制造车间对车间设备的监控不够智能化、数字化,并且光缆制造车间一些设备缺少必要的识别异常状态和故障状态的能力,缺乏实时在线故障诊断和三维可视化监控系统。

目前,数字孪生逐步被应用在工业车间中,陶飞等<sup>[6]</sup>提出数字孪生车间实现对车间生产过程的

实时监控,阐述了虚拟车间的系统组成和实现。赵浩然等<sup>[7]</sup>提出多层次的三维可视化实时监控,利用实时数据对虚拟车间进行驱动。段明峰等人<sup>[8]</sup>搭建了装配车间孪生场景,实现了数据的实时采集和监控。虽然以上学者围绕数字孪生车间实时可视化进行了深入研究,但对于车间设备的故障诊断问题尚存在一些不足。综上所述,本文以光缆车间中光纤二次套塑车间为主要研究对象,提出使用数字孪生技术实现对光纤二次套塑车间三维可视化监控和故障诊断的方法,最后以实例验证了所提方案的有效性。

## 1 光纤二次套塑车间数字孪生系统框架

数字孪生是指在虚拟世界中建立一个与物理实体相互映射的模型,其具有实时同步、高保真等特点<sup>[9]</sup>。光纤二次套塑车间数字孪生模型的构建,需要采集车间设备的运行数据、历史数据和环境数据,并传输至数字孪生模型中。在光纤二次套塑车间运行时,使数字孪生车间与光纤二次套塑物理车间的运行状态保持一致,从而在数字孪生平台对车间生产过程及生产环境进行可视化监控。监测车间设备的运行状态并对历史数据进行存储,同时把车间获取的数据信息经过处理,之后在车间状态实时看板上进行动态可视化显示。当光纤二次套塑车间工作异常时,数字孪生系统可以快速定位到异常设备并进行故障诊断,确定异常设备的故障位置和故障类型,可以在系统中对故障进行三维可视化显示和示警,图 1 所示为光纤二次套塑车间数字孪生系统框架。

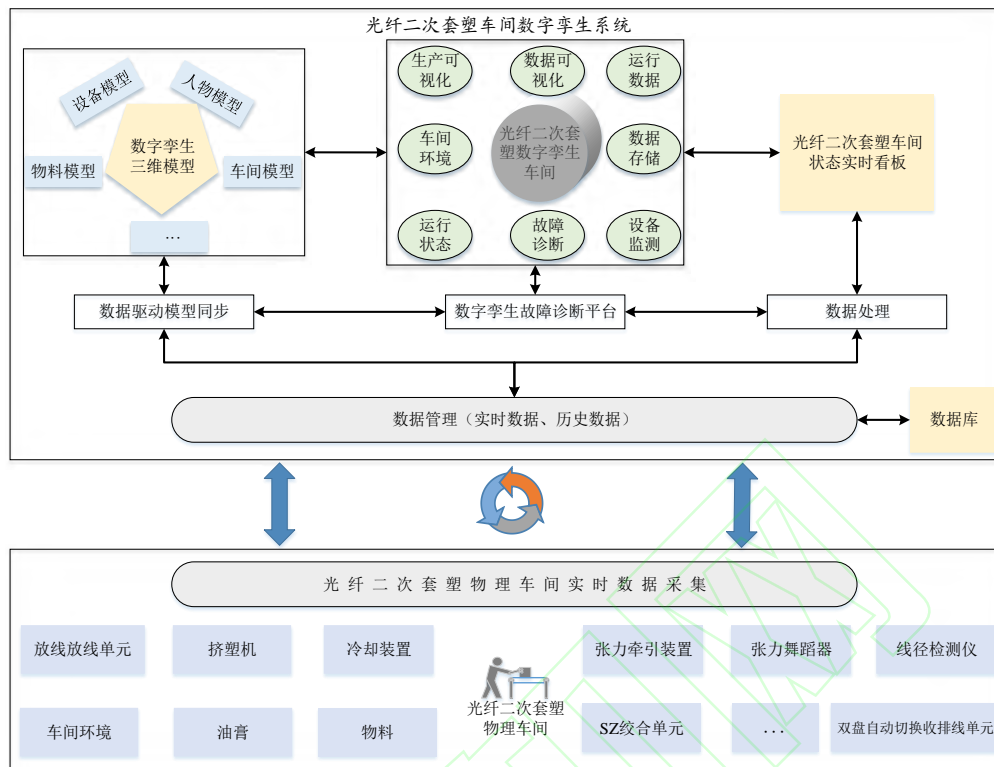


图1 光纤二次套塑车间数字孪生系统框架

Fig.1 The framework of the digital twin system of the optical fiber secondary coating workshop

## 2 光纤二次套塑车间数字孪生模型

高度为 2.9 m，车间相关技术指标如表 1 所示。

### 2.1 光纤二次套塑车间设备及其建模

二次套塑工序是将聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）等高分子材料，通过挤压方式在光纤带上包裹成一个松套管，并使用专用油膏填充在光纤带和松套管之间来保证光纤化学性质、物理性质稳定。二次套塑生产线是整个光缆生产过程中最重要的工序，与光缆的产品质量密切相关，其中决定产品质量的三个主要因素是：温度、生产速度和张力。整机运行速度是以牵引轮的速度为基准，挤塑机、油膏填充、收线都需要按照一定的比例跟随牵引速度进行变化，并且还需要与牵引速度保持同步升降。

二次套塑生产线包含：放线单元、SZ 绞合单元、挤塑机、冷却系统、线径检测仪、张力舞蹈器和双盘自动切换收排线单元，并且二次套塑生产线的设备总长应不超过 24 m（从放线架到收线架），

表 1 技术指标  
Tab.1 Technical Analysis Indicators

名 称	数 值
生产速度	Max 600 m/min *
光纤芯数	1 cores~12 cores
放线张力	(0.4 N~1.5 N)±0.1 N
套管外径	Φ1.2mm~3.5 mm
余长范围	(0~3‰)±0.05‰
计米精度	< 2‰
附加损耗	≤0.02 dB/km
外型尺寸	L ≤ 25 m, W ≤ 3.5 m
电 压	380 V 50 Hz
总功率	> 90 kW

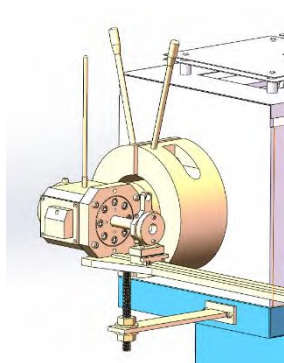
注：\*由产品结构决定

对二次套塑车间设备使用 3Dmax 和 Maya 软件进行建模，构建出车间设备的几何模型，如图 2~图 4 所示，在 Unity3D 中设置相应的材质和贴图，赋予车间设备物理属性。





(a)实物图



(b)未上色模型图

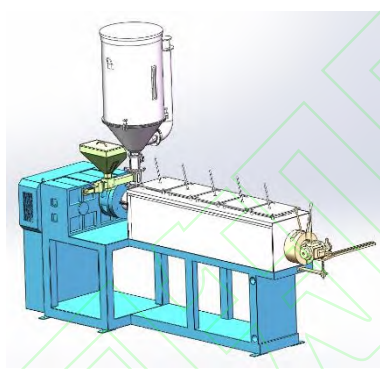


(c)上色后模型图

图2 挤塑机机头部分  
Fig.2 Extruder head part



(d)实物图

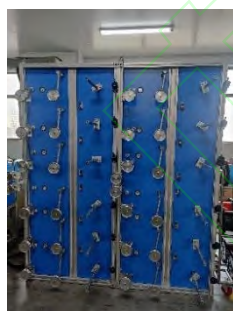


(e)未上色模型图

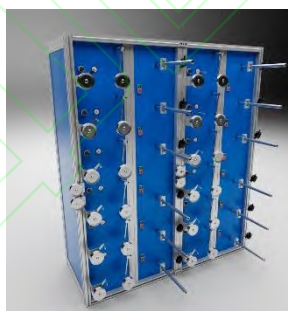


(f)上色后模型图

图3 挤塑机整体图  
Fig.3 Overall drawing of extruder



(g)正面实物图



(h)正面模型图



(i)背面实物图



(j)背面模型图

图4 放线单元  
Fig.4 Pay-off unit

为实现虚拟二次套塑车间对物理车间的实时映射,需在几何模型的基础上融合其物理模型、行为模型和规则模型,从多维度对二次套塑车间进行描述<sup>[10]</sup>,如图5所示。

几何模型包括车间设备的形状、位置、尺寸和

部件“父子”关系等要素,与物理车间拥有优良的时空一致性,通过渲染效果使其从视觉上与物理车间保持一致<sup>[11]</sup>。

物理模型是在几何模型的基础上增加了设备的物理属性,如压力、转速、电流和磨损等,实现

对物理参数变化过程的仿真，使用的软件为：ANSYS、ABAQUS 有限元分析软件等。

行为模型通过响应物理二次套塑车间受到的驱动和扰动因素，结合控制指令和自身内部运行机制下的行为进行描述，包含车间生产行为、故障行为和调度行为等。

规则模型是让虚拟模型具备关联、约束、推演和故障诊断的能力。在历史关联数据的规律规则、

历史知识经验规则以及光缆车间标准规则基础上，利用机器学习算法发掘新的规则，这些规则随着时间的变化会不断地完善、演化<sup>[12]</sup>。

数字孪生模型是通过以上四种模型融合而成，使构建的虚拟模型可以实时对物理实体进行控制、可视化监测和故障诊断等，并以三维的形式进行车间作业仿真。

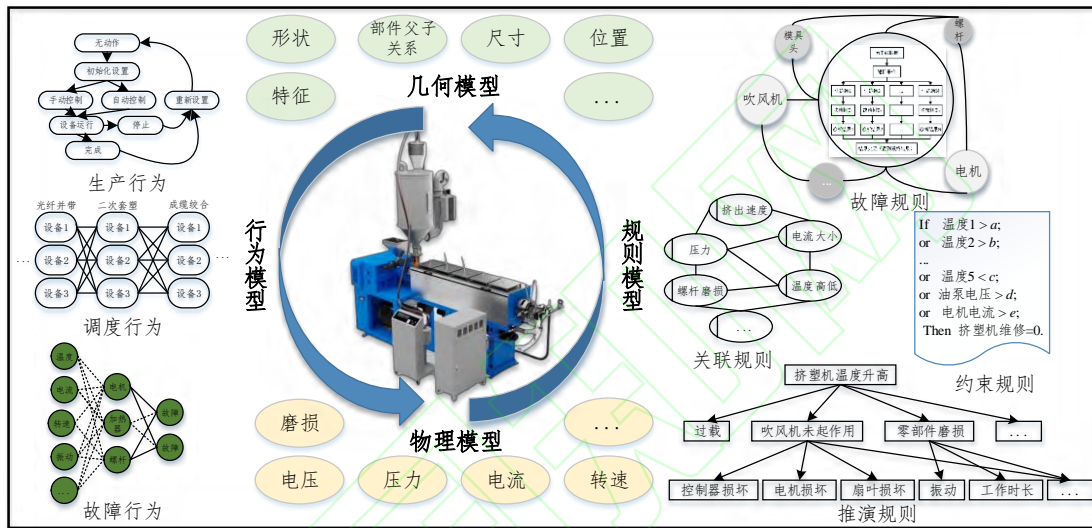


图5 光纤二次套塑车间多维模型的构建

Fig.5 Construction of multi-dimensional model of optical fiber secondary coating workshop

## 2.2 构建虚拟孪生场景

三维可视化监控需要有较强的交互性和逼真的虚拟场景，Unity3D 因其强大的渲染效果、交互性和场景漫游功能<sup>[13]</sup>，可以实现对虚拟车间场景搭建，在搭建的场景中应包含 GUI、场景漫游、孪生数据和数字孪生模型。如图 6 所示，首先，使用 3Dmax、Maya 等建模软件对光缆制造车间建模，将建好的模型进行轻量化处理之后导入 Unity3D 中，不同软件之间模型单位大小不统一，需要调整模型的大小单位然后再进行导入，并且需要将模型的贴图一并导入 Unity3D 中。其次对导入的三维模型按照车间真实布局进行渲染，设置部件之间的“父子”关系，根据模型材质设置相应的物理碰撞效果，最后通过 C#脚本设置相应的规则、响应，

对设备进行驱动。孪生场景与 MySQL 数据库连接实现数据的交互，数据的交互传递实现虚拟车间和物理车间的实时映射。

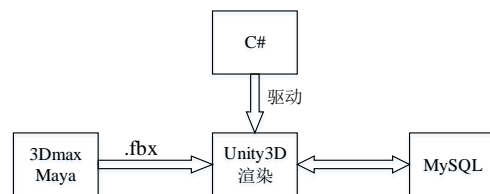


图6 虚拟孪生场景构建

Fig.6 Virtual twin scene construction

## 3 光纤二次套塑车间数字孪生系统

### 3.1 基于数字孪生的可视化监控系统

本文搭建的数字孪生系统分为五层：物理层、感知层、数据传输层、数据处理层、仿真分析层。

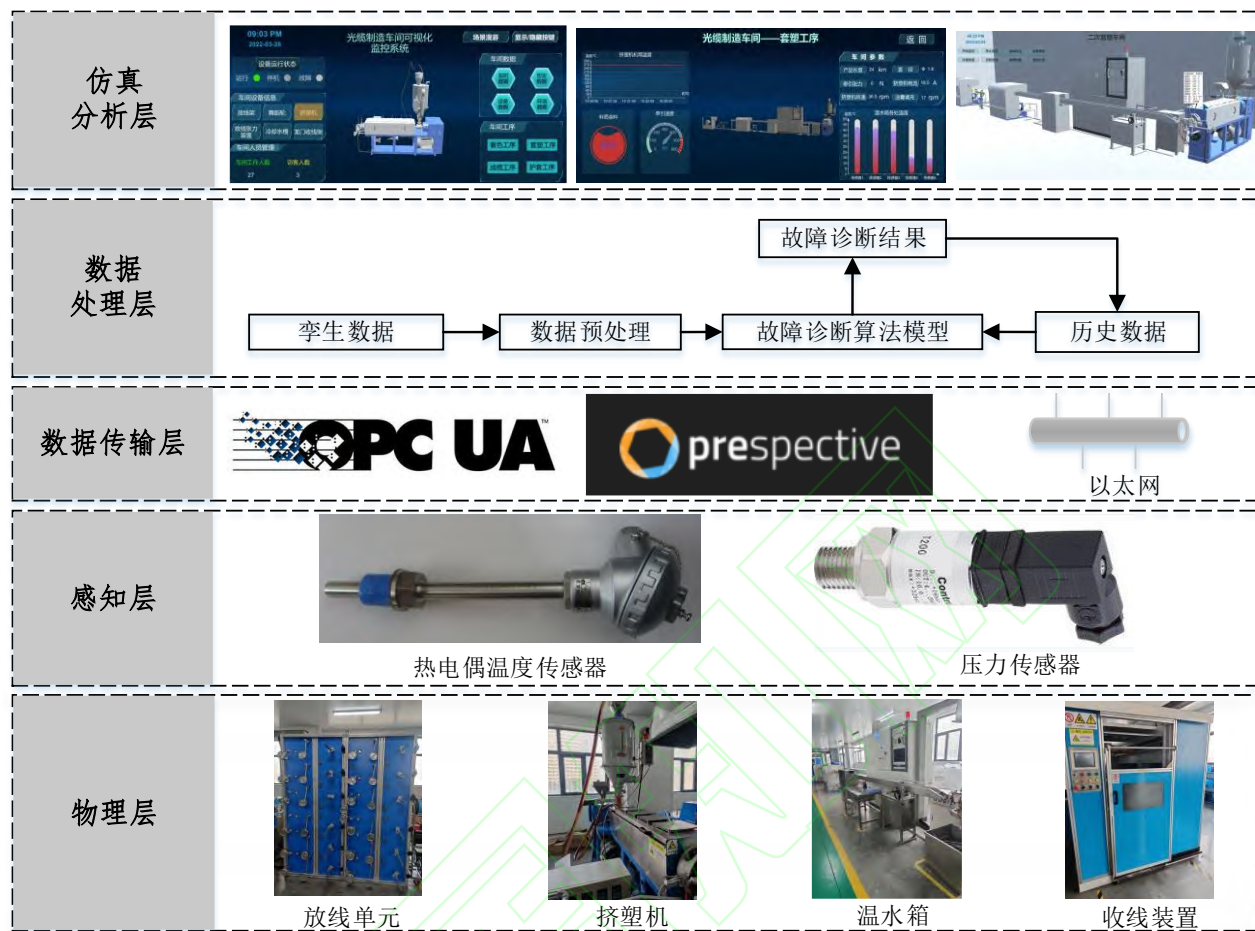


图 7 数字孪生可视化监控系统组成

Fig.7 The composition of the digital twin visual monitoring system

物理层是指光纤二次套塑车间中的放线架单元、挤塑机、舞蹈轮等设备及其各种零部件，还包括车间中安装的各种电气设备（如各种型号的电机、西门子 PLC1500、变频器等）和车间的实时生产环境。

感知层功能是从物理二次套塑车间获取车间运行数据信息，其中包含各种传感器和数据采集装置，其中有温度传感器、压力传感器、加速度传感器、转速传感器和电压电流采集装置等。

数据传输层是将感知层采集到的各种数据信息传输至数字孪生体中，常见的数据传输方式有现场总线、工业以太网等通讯方式。由于目前大多数车间中的 PLC（如 PLC1500 等）支持 OPC UA 通讯协议，且 OPC UA 通讯协议具有可以实现跨平台

操作、提供统一的地址空间和服务等优点<sup>[14][15]</sup>，因此本文采用 OPC UA 通讯协议结合 Unity3D 中插件 PREspective 来实现光缆制造车间数据的传输。

数据处理层是实现车间仿真和故障诊断的关键，可以为仿真分析层的决策提供诊断依据，现阶段使用机器学习算法来处理所获得的数据，例如随机森林算法<sup>[16]</sup>、支持向量机<sup>[17][18]</sup>。其中，在使用机器学习算法之前需要对数据进行预处理，包含检查数据是否缺失、数据的可靠性验证、数据去噪、特征提取等。

仿真分析层是一个可视化的窗口，是对光缆车间的三维可视化监控，可以实现数据可视化和故障可视化，并且可以下达相关指令反馈给物理实体，与物理实体是一个相互映射的过程。



### 3.2 基于数字孪生的故障诊断系统

在车间三维可视化监控中,实现对车间设备的运行状态进行故障诊断是十分有必要的。当车间设备异常时,可以通过数字孪生故障诊断系统进行快速定位,并分析故障类型,节约光缆车间设备的维修时间,提高光缆车间生产效率。故障诊断方法一般可以采用数据驱动、模型驱动进行故障诊断。

数据驱动故障诊断的方法是:从工控机和各种传感器获取到车间设备的实时运行数据和历史运行数据,通过历史运行数据训练机器学习算法模型,通过训练好的机器学习模型对实时数据进行故障诊断。数据驱动的优点是随着历史数据的不断累加,故障诊断模型会愈加完善,故障诊断的精度也会不断提升。其缺点是:(1)数据一旦出现差错会导致算法模型出现偏差,对诊断结果产生影响;(2)对没有学习过的故障适用性比较低<sup>[19]</sup>。

模型驱动故障诊断方法需要构建物体的3D几何模型、物体内部逻辑关系的数学模型、全尺度物理场仿真的模型。其优点是可以从物体机理上反映物体的故障,可以解决数据驱动中数据偏置导致模型出现差错的问题。其缺点是物理模型一旦确定,模型的精度就不会发生改变,不可以通过历史数据来动态地增加模型精度。

由于数据驱动和模型驱动存在不同的缺点,所以可以通过数字孪生体与车间数据融合共同对车间设备进行故障诊断,既使用机器学习故障诊断算法实现故障诊断,又可以通过数字孪生模型对车间模拟仿真实现故障诊断,两者融合形成一个稳定、动态、实时、准确的故障诊断系统。

挤塑机是二次套塑车间的核心设备,挤塑机一旦发生故障,会影响整条生产线的生产进度,本文通过结合随机森林故障诊断模型与挤塑机孪生模型,实现挤塑机的监控和故障诊断<sup>[20]</sup>,保障光纤二次套塑车间的稳定、安全和智能生产。

随机森林(Random Forests, RF)算法是基于多个决策树的集成分类器<sup>[21]</sup>,从原始数据集中通过

Bootstrap 采样方法得到  $N$  个新的训练样本集,并随机的选取  $m$  个特征。每个新的训练样本集,可以生成相应的决策树,最终每个决策树进行投票,选取多数诊断结果作为 RF 模型诊断的最终结果,如图 8 所示。

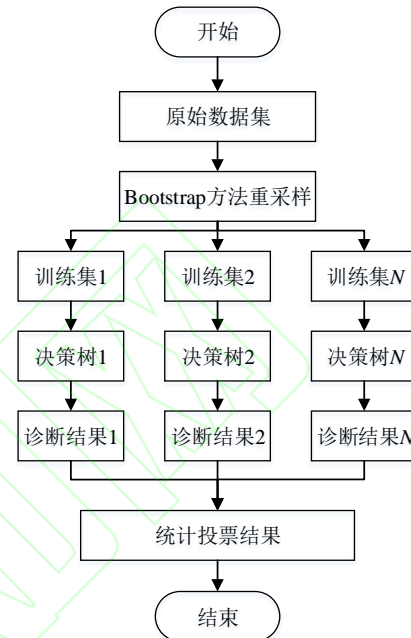


图 8 随机森林分类流程图

Fig.8 Random Forest Classification Flowchart

RF 模型结合数字孪生模型对设备进行故障诊断的具体流程如图 9 所示。

步骤 1 构建车间设备的数字孪生模型。

步骤 2 对挤塑机历史数据(如挤塑机电机的定子电流,油泵电压等)进行预处理,使用 VMD 分解、提取故障特征,并划分训练集和测试集。

步骤 3 通过训练集训练 RF 故障诊断模型,并用测试集验证其准确性。

步骤 4 对实时数据预处理后放入 RF 诊断模型,输出结果。

步骤 5 孪生模型接收实时数据并进行模拟仿真,并对故障诊断结果进行校验和可视化显示。

步骤 6 将诊断结果进行一致性判定,若诊断结果一致,则输出故障类型和故障等级,并对故障分析、优化决策方案反馈给物理实体。反之则更新故障数据库,丰富历史统计数据,有利于后期机器



学习模型的训练和故障分析。

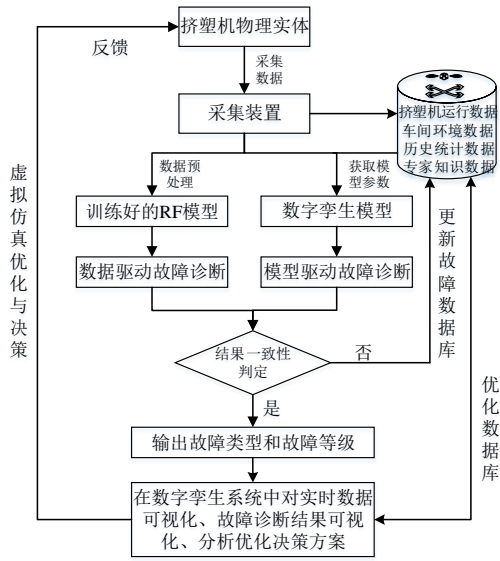


图9 挤塑机故障诊断框图

Fig.9 Fault diagnosis block diagram of extruder

### 3.3 孪生数据的存储

在数字孪生系统中数据存储十分重要，本文使用 MySQL 数据库进行数据的传输和存储，MySQL 数据库具有以下优点：数据库体积小、运行速度快和复杂程度低等。在 Unity3D 中通过编写 C#脚本或者使用 Bolt 插件实现与 MySQL 数据库的连接。

如图 10 所示，当系统运行时，首先会打开数

据库，读取数据库中存储的数据，完成指令后系统会关闭数据库。在 Unity3D 中通过更改“数据库管理”模块，实现对 MySQL 数据库进行“读”“删”“查”“改”“更”“存”的功能。图 11 是 Unity3D 读取 MySQL 数据库的程序框图，图中的“服务器信息”填写 MySQL 数据库的“IP 地址”“端口”“用户名”“密码”和“数据库名称”，图 12 是将 MySQL 数据库中的数据读取到数字孪生系统中并以表格的形式进行展示。

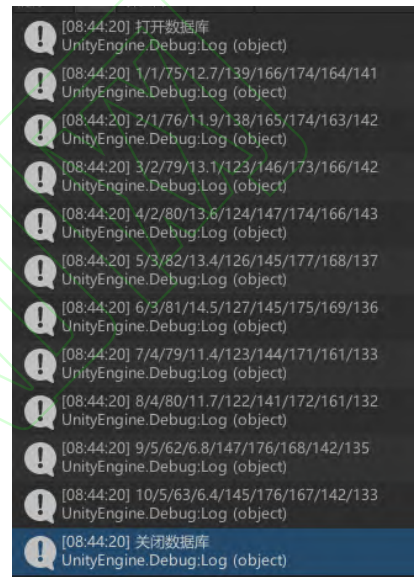


图 10 Unity3D 读取数据库

Fig.10 Unity3D reads the database

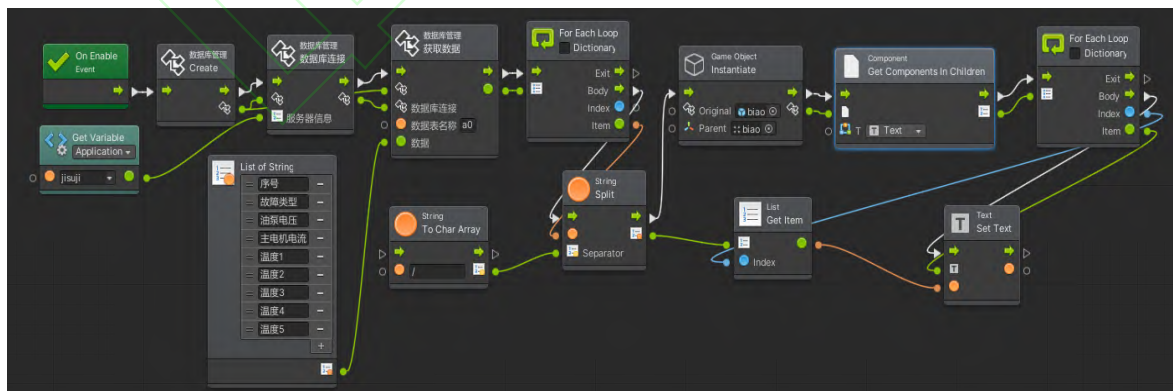


图 11 使用 Bolt 与 MySQL 数据库连接

Fig.11 Connecting to MySQL database using Bolt

挤塑机历史故障数据									返回
序号	故障类型	油泵电压	主机电流	温度1	温度2	温度3	温度4	温度5	
1	1	75	12.7	139	166	174	164	141	
2	1	76	11.9	138	165	174	163	142	
3	2	79	13.1	123	146	173	166	142	
4	2	80	13.6	124	147	174	166	143	
5	3	82	13.4	126	145	177	168	137	
6	3	81	14.5	127	145	175	169	136	
7	4	79	11.4	123	144	171	161	133	

图 12 Unity3D 读取并展示 MySQL 数据  
Fig.12 Unity3D reads and displays MySQL data

## 4 应用验证

本文以 Unity3D 软件作为三维可视化的系统平台,结合 MySQL 数据库、Bolt 插件、PREspective 插件、C#脚本、Xcharts 2.6.0 等共同搭建光缆制造车间可视化监控平台,以某光缆生产车间中二次套塑工序为应用背景,二次套塑车间已经布置了相应的数据采集装置。基于数字孪生光缆制造车间可视化监控系统主要包含 3 个虚拟场景,通过点击场景中的 UI 按键来跳转相应功能场景。

图 13 为光缆制造车间可视化监控系统的主界面,当系统开始运行时,系统会获取生产现场的孪生数据来驱动虚拟模型,使其与实际生产保持映射关系,可以监测设备的运转情况。此时主界面会监测到车间设备的运行状态、数据信息。通过点击车间设备信息如“挤塑机”,显示当前点击设备的工作状态以及工作数据,也可以将模型分解成若干个小单元,观测模型内部的运作情况。车间数据包含

实时数据、历史数据、设备数据和环境数据,可以通过点击历史数据查看车间的以往运行状况,实时数据会以图表的形式展现。也可以选择车间不同的工序,来显示相应工序的实时数据。

系统借助 Xcharts 插件绘制可视化图表,使用了以时间为横坐标,挤塑机温度为纵坐标的折线图 (Line Chart),可以动态地监测挤塑机温度,超出或者低于设定温度系统会示警,温度过低时系统会增加料筒加热器的功率,从而提升挤塑机料筒的温度;挤塑机料筒温度过高时,数字孪生系统根据规则生成决策方案,并下发启动物理系统中吹风机的指令,使温度维持在正常运行范围之内。使用 Liquid Chart 监测挤塑机料筒余量,使用 Gauge Chart 显示生产线速度,冷却水槽由五个温度传感器进行监测,将监测数据传输至孪生系统,并在柱状图 Bar Chart 上动态显示。

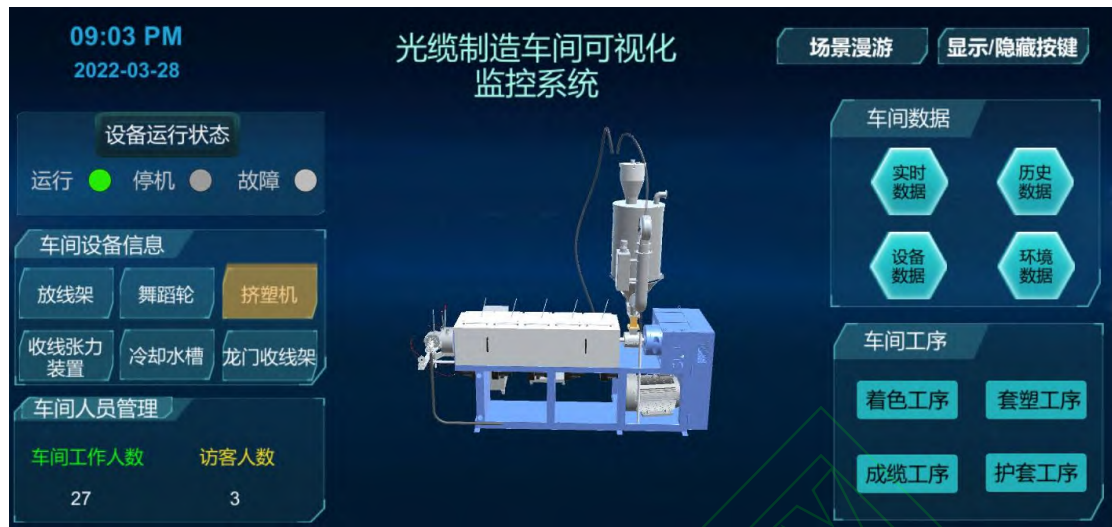
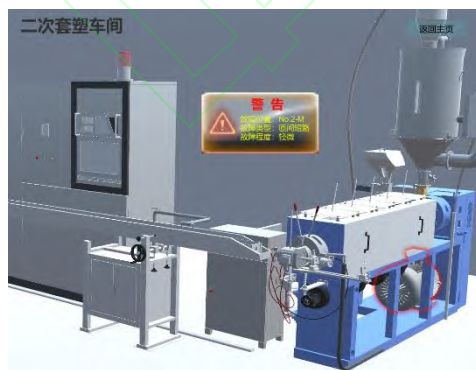


图 13 监控系统主界面  
Fig.13 Monitoring system main interface

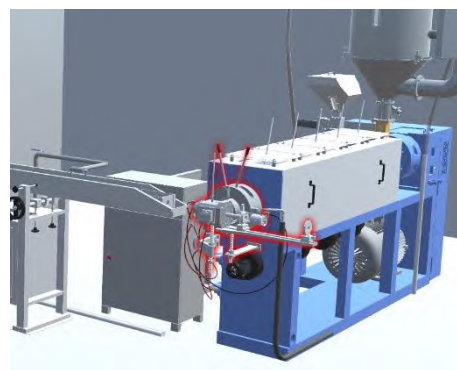
如图 15 所示,该场景是对物理二次套塑车间的数字孪生仿真,可以反映物理车间的实时工作情况,以达到监测效果。点击开始监控,系统开始接收车间的运行数据,利用实时数据驱动数字孪生仿真模型,仿真车间的运作。孪生系统也会根据不同光纤类型,设置与之对应的光纤生产参数,并反馈给物理车间,从而实现物理车间与孪生车间的双向交互。使用孪生系统中的场景漫游,选择第一人称(First Person Perspective, FPP)或者第三人称(Third Person Perspective, TPP)视野去监测设备的运行状

态,点击设备显示设备运行状态和运行数据。

当系统检测到车间设备发生故障时,会弹出警告窗口,显示故障位置、故障类型和故障程度,并且对故障位置高亮显示,如图 14 所示。图 14 (a)、14 (b) 分别是挤塑机电机和机头发生故障时的界面,系统根据挤塑机故障程度分为“健康”“轻微故障”“中等故障”和“严重故障”四种。点击故障设备的爆炸视图(Exploded View)显示故障的具体位置,便于分析故障原因,有利于工人快速维修恢复光纤生产。



(a)挤塑机电机故障



(b)挤塑机机头位置故障

图 14 挤塑机故障界面  
Fig.14 Fault interface of extruder



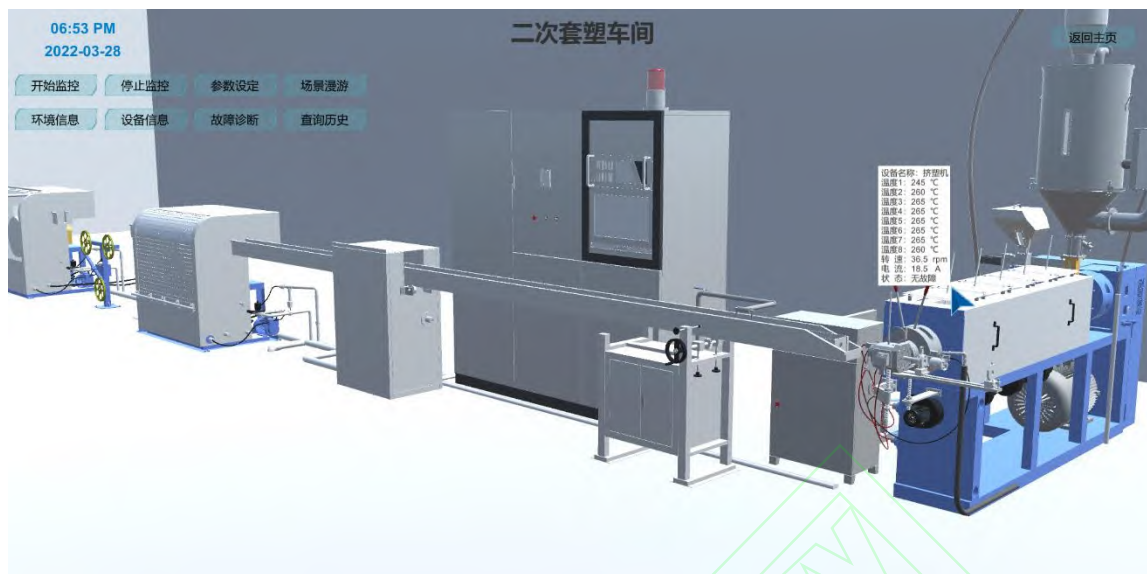


图 15 光纤二次套塑车间可视化界面

Fig.15 Visual interface of optical fiber secondary coating workshop

## 5 结论

本文将数字孪生技术与光纤二次套塑车间相结合,通过构建车间的三维数字孪生模型来实现光纤二次套塑车间的可视化监控,更加直观地监控车间设备的运行状态和运行数据,实现对光纤二次套塑车间全流程和全要素的动态监控,并且系统还能结合数据驱动和模型驱动对车间设备故障诊断。数字孪生可视化监控系统不仅可以对当前工作情况进行动态监测,还可以追溯历史状态对历史画面进行重现,本系统提高了光纤二次套塑车间数字化、智能化的水平,为车间的安全可靠运行提供了保障,将来随着数字孪生技术不断完善和发展,可以实现对光缆车间中的设备进行预测性维护和全生命周期管理,这也为光缆车间向数字化、智能化转型带来了机遇和挑战。

## 参考文献

- [1] 陶飞,刘蔚然,张萌等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(01):1-18.  
TAO Fei,LIU Weiran,ZHANG Meng,et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2019, 25(01): 1-18.
- [2] 陶飞,张辰源,张贺等.未来装备探索:数字孪生装备[J].

计算机集成制造系统, 2022, 28(01): 1-16.

TAO Fei,ZHANG Chenyuan, ZHANG He,et al. Future equipment exploration: digital twin equipmen[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2022, 28(01):1-16.

- [3] 杨宇霆. 光纤并带机电气控制系统[J].现代信息技术,2019,3(13):68-70.

YANG Yuting. The Automatic Control System of Optical Fiber Ribbon Coating Line[J]. Modern Information Technology, 2019, 3(13):68-70.

- [4] 汪鹏. 光缆制造过程调度仿真研究[D].淮南: 安徽理工大学,2018.

WANG Peng. Study on the Scheduling Simulation of Optical Fiber Cable Manufacturing Workshop[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.

- [5] 秦志伟. 基于 MES 的光缆制造过程优化与监控系统研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2018.

QIN Zhiwei. Research of optimization and monitoring system for Optical Fiber manufacturing process Based on Manufacturing Execution System[D].Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.

- [6] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(01):1-9.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital



- twin workshop: a new paradigm for future workshop[J], Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017, 23(01):1-9.
- [7] 赵浩然,刘检华,熊辉,等.面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(06):1432-1443.
- ZHAO Haoran, Liu Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2019,25(06):1432-1443.
- [8] 段明峰,张南,耿华,等.基于数字孪生的装配车间实时监控系统的开发[J].制造业自动化,2021,43(12):110-112.
- DUAN Minghao, ZHANG Nan, GENG Hua, et al. Development of real-time monitoring system for assembly workshop based on digital twin[J]. Manufacturing Automation, 2021,43(12):110-112.
- [9] 张霖,陆涵.从建模仿真看数字孪生[J].系统仿真学报,2021,33(05):995-1007.
- ZHANG Lin, LU Han. Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021,33(05):995-1007.
- [10] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J].计算机集成制造系统,2017,23(08):1603-1611.
- TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017, 23(08): 1603-1611.
- [11] 肖通,江海凡,丁国富,等.五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J].系统仿真学报,2021,33(12):2880-2890.
- XIAO Tong, JIANG Haifan, DING Guofu, et al. Research on Digital Twin-based Modeling and Monitoring of Five-axis Grinder[J]. Journal of System Simulation, 2021,33(12):2880-2890.
- [12] 张辰源,陶飞.数字孪生模型评价指标体系[J].计算机集成制造系统,2021,27(08):2171-2186.
- ZHANG Chenyuan, TAO Fei. Evaluation index system for digital twin model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2021, 27(08): 2171-2186.
- [13] 任福深,孙雅琪,胡庆,等.基于 Unity3D 的水下机器人半实物仿真系统[J].系统仿真学报,2020,32(08):1546-1555.
- REN Fushen, SUN Yaqi, HU Qing, et al. Hardware-in-the-Loop Simulation System for Underwater Vehicle Based on Unity3D[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(08):1546-1555.
- [14] 柳林燕,杜宏祥,汪惠芬,等.车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(06):1536-1545.
- LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huifen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(06):1536-1545.
- [15] 顾岩,程免翀,王震,等.基于 OPCUA 的 3D 实时监控系统设计及实现[J].系统仿真学报,2017,29(11):2767-2773.
- GU Yan, CHENG Huanchong, WANG Zhen, et al. Design and Implementation of 3D Monitoring System Based on OPC UA[J]. Journal of System Simulation, 2017,29(11):2767-2773.
- [16] 黄瑾,刘洋,钟麦英,等.利用随机森林算法的卫星控制系统故障诊断[J].宇航学报,2021,42(04):513-521.
- HUANG Jin, LIU Yang, ZHONG Maiying, et al. Fault Diagnosis of Satellite Attitude Control Systems Using Random Forest Algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2021,42(04):513-521.
- [17] 刘广孚,杜玉龙,郭亮,等.基于单分类支持向量机的潜油电泵工况及故障诊断[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(05):162-168.
- LIU Guangfu, DU Yulong, GUO Liang, et al. Operating condition and fault diagnosis of electric submersible pump based on OCSVM[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2021,45(5):162-168.
- [18] 孙健,王成华,洪峰,王蕾.基于人工鱼群优化支持向量机的模拟电路故障诊断[J].系统仿真学报,2014,26(04):843-847.
- SUN Jian, WANG Chenghua, Hong Feng, WANG Lei. Analog Circuit Fault Diagnosis Based on Artificial Fish Swarm Optimization Support Vector Machine[J]. Journal of System Simulation, 2014,26(04):843-847.
- [19] 杨帆,吴涛,廖瑞金,等.数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法[J].高电压技术,2021,47(05):1505-1521.
- YANG Fan, WU Tao, LIAO Ruijin, et al. Application and Implementation Method of Digital Twin in Electric

- Equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(05): 1505-1521.
- [20] 江悦,沈小军.碱性电解槽制氢设备数字孪生体构建及应用[J].高电压技术,2022,48(05):1673-1683.  
JIANG Yue, SHEN Xiaojun, Construction and Application of Digital Twin in Hydrogen Production System of Alkaline Water Electrolyzer [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (05) : 1673-1683.
- [21] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001,45(1):5-32.

