数字孪生 · 装备制造业数字化转型

数字孪生技术
赋能装备制造业数字化转型

宁夏大学　　梁云峰　　13995013762

技术起源 · 概念内涵 · 应用领域 · 应用案例 · 发展趋势

汇报目录

五个部分，覆盖起源、概念、内涵、领域、案例与趋势

01 技术起源
从航天工程概念到多行业落地的演进历程

02 概念与核心内涵
概念定义、五维模型体系与相关概念辨析

03 应用领域
十大领域概览与装备制造三层级落地

04 应用案例
采掘、新能源、水电与液压装备孪生实践

05 发展趋势
数智孪生、多智能体融合与未来演进方向

01 技术起源

数字化制造的四个发展阶段

CAD 阶段

以单项技术（如计算机辅助设计软件）为主要工具进行产品设计、优化与分析，提高研发速度与品质；CAD/CAM 由二维向三维转变，CAE 进入实用化阶段，仿真与设计是主要功能。

CIM 阶段

以 CAD、CAM、CAPP、MRP 等框架为基础；20 世纪 80 年代发展为计算机集成制造系统（CIMS），打通设计、制造环节壁垒，实现信息共享，降低全生命周期信息管理与沟通成本。

网络化制造

20 世纪 90 年代初互联网迅速发展，CIMS 与互联网进入集成与协同阶段，信息物理融合系统概念被提出；实现信息系统与物理系统互联协同，具备数字化、柔性化特点。

智能制造阶段

2010 年以来物联网迅速发展，基于物联网理念的制造物联（IoMT）实现制造装备与智能设备间信息共享，并对产品从概念设计到售后服务的全生命周期信息进行管理。

自 20 世纪 50 年代以来，传统制造业不断向数字化制造升级，经历 CAD、计算机集成制造、网络化制造到智能制造四个阶段。纵观数字化制造发展过程，制造业趋势由单一技术独立应用走向多技术协同发展，数据始终是制造过程的核心。如何对多源异构信息进行融合管理、优化产品设计与制造过程中的行为决策，成为急需解决的问题。

01 技术起源

数字孪生概念始于航天工程领域，经历了“技术探索、概念提出、应用萌芽、行业渗透”四个发展阶段

1969年

美国 NASA 阿波罗计划运用数字孪生概念

2003年

美国密歇根大学 Michael Grieves 教授提出“与物理产品等价的虚拟数字化表达”概念

2011年

美国空军研究实验室（AFRL）应用到战斗机维护

2012年

NASA 与 AFRL 合作发布技术路线图，数字孪生进入公众视野

2014年

形态和概念不断丰富，被通用电气、达索、西门子等公司接受并推广

2015年

通用电气基于数字孪生实现对发动机的实时监控和预测性维护

2017-2019年

Gartner 连续 3 年将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一

2020年

工信部电子技术标准化研究院发布《数字孪生白皮书》，提出数字孪生广泛应用于工业、城市管理、交通、健康医疗等垂直行业

01 技术起源

研究文献统计与发展历程

- 2003 年 Grieves 教授提出概念（镜像空间模型），受限于传感、算力与算法不成熟，未获广泛关注
- 2012 年 NASA 与美国空军研究实验室合作提出未来飞机数字孪生示例，开始受到重视
- 2017 年起相关论文数量持续飙升，2022 年数量约为 2017 年的 20 倍
- 成果主要来自引领制造业智能化的美国、德国和中国，其他国家研究人员贡献约 50% 文章

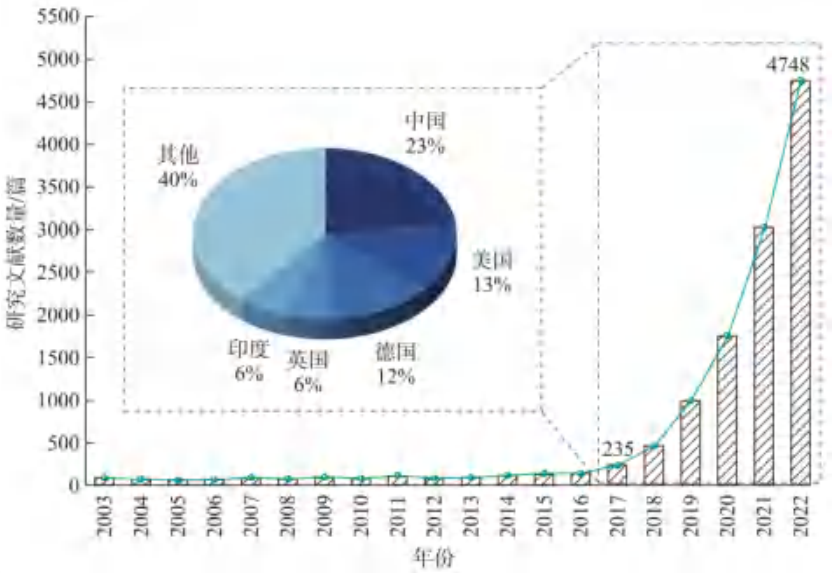


图 2 2003—2022 年数字孪生研究文献统计

01 技术起源

数字孪生定义的演化（表 1 选录）

学者 / 时间	数字孪生定义与解释
Grieves 2003 年	镜像空间模型：包含一直存在的物理系统，以及包含物理系统所有信息的新虚拟系统，用于产品生命周期管理
Shafto 2010 年	由物理产品、虚拟产品以及两个飞行器之间的通信组成
Tuegel 2011 年	面向飞行器或系统的高集成度多物理场、多尺度、多概率仿真模型，利用物理模型、传感器数据和历史数据反映功能、实时状态及演变趋势
Glaessgen 等 2012 年	集成的多物理场、多尺度概率模拟，使用最佳物理模型、传感器更新与飞机历史数据反映飞行孪生体寿命
赵敏 2016 年	物理实体在数字世界形成镜像式数字产品，通过状态感知、分析计算、自我决策、精准执行、学习提升实现人造智能
陶飞等 2018 年	集成多物理、多尺度、多学科属性，具有实时同步映射、高保真特性，实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段

共识：数字孪生是物理世界与虚拟世界的结合，孪生模型通过数据传输实时映射物理实体状态，并根据实体变化作出相应决策，过程实时且双向。

02 概念与核心内涵

数字孪生到底是什么？

定义：数字孪生（Digital Twin, DT）以**数字化方式**建立物理实体的**多维**、**多时空尺度**、**多学科**、**多物理量动态虚拟模型**，仿真刻画**物理实体在真实环境**中的**属性**、**行为**与**规则**。

三大核心特点

- 虚实融合与实时交互
- 迭代运行与持续优化
- 全要素、全流程、全业务数据驱动



02 概念与核心内涵

数字孪生模型的演进（表 2 选录）

学者 / 时间	模型特征
Grieves 2011 年	三维模型：产品在物理空间、产品在虚拟空间，以及两空间之间的数据连接
Tao 等 2019 年	五维模型：物理实体、虚拟环境、孪生数据、交互、服务，应用最广
Leng 等 2020 年	物理环境控制、虚拟环境模型、信息物理系统同步模型
Zheng 等 2020 年	物理层、数据提取与集成层、网络层、交互层
Zhang 等 2021 年	数据层、服务层、模型层、物理层
Stark 等 2019 年	数字孪生八维模型
Madni 等 2019 年	虚拟映射四层次：前数字孪生、数字孪生、自适应数字孪生、智能数字孪生

陶飞等五维模型为我国数字孪生发展提供了研究基础，已被研究人员**广泛接受并使用**。

02 概念与核心内涵

从三维模型扩展到五维模型，新增了哪两个维度？

传统三维模型（Grieves 定义）

- 物理实体（PE）
- 虚拟实体（VE）
- 二者之间的连接（CN）

难以承载信息物理融合数据、服务化按需使用与多维度刻画等新需求，缺乏面向不同对象的通用参考架构。

扩展后的五维模型（陶飞提出）

- 保留 PE、VE、CN，并新增两个维度
- 孪生数据（DD）：融合信息数据与物理数据，作为模型驱动
- 服务（Ss）：各类数据、模型、算法、仿真与结果的服务化封装

作为通用参考架构，可与物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术集成，支持虚实双向连接与实时交互。

五维模型：$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN)$

02 概念与核心内涵

五维模型由五个部分和六对连接构成一个闭环

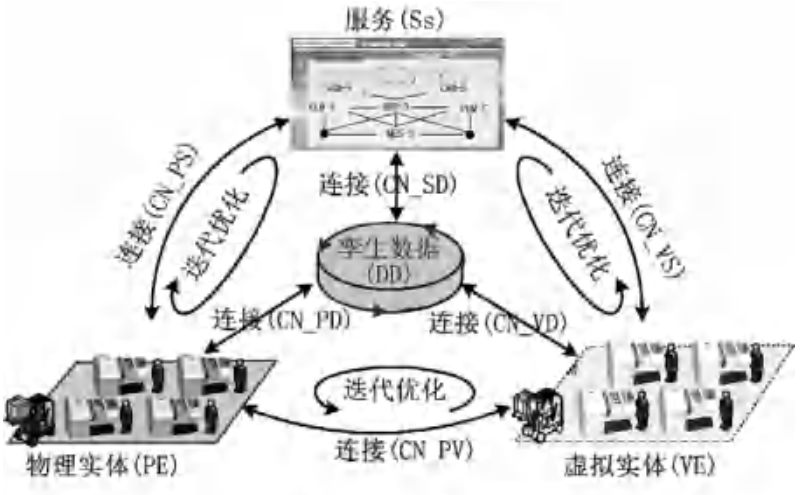


图1 数字孪生五维概念模型

五部分间通过六对连接实现双向交互与迭代优化。

PE 物理实体

模型的构成基础，被分析、监测与维护的现实对象

VE 虚拟实体

从几何、物理、行为、规则多维度刻画物理实体

Ss 服务

对数据、模型、算法、仿真与结果服务化封装，按需提供

DD 孪生数据

模型的驱动，融合实体、虚拟、服务、知识与衍生数据

CN 连接

实现各部分互联互通，支撑虚实实时互联与迭代优化

02 概念与核心内涵

物理实体为什么要按三个层级分层建模？

PE 是五维模型的构成基础，对 PE 的准确分析与有效维护是建立 M_DT 的前提。PE 具有层次性，按功能与结构分为三个层级；以数字孪生车间为例，不同层级对应不同的管控粒度。

实体层级	车间中的对应对象	孪生建模与管控任务
单元级 Unit PE	车间内各台设备	功能实现的最小单元；监测设备状态、故障预测与维护
系统级 System PE	按工艺工序组合配置的生产线	完成特定零部件加工任务；调度、进度控制与产品质量分析优化
复杂系统级 SoS PE	由生产线组成的整个车间	含物料流、能量流、信息流；描述子系统交互耦合，分析预测系统演化

按应用需求与管控粒度对 PE 分层，是分层构建 M_DT 的基础：既可为单台设备建模，也可面向生产线乃至整个车间建模。

02 概念与核心内涵

虚拟实体由四类模型组装融合而成

模型组成	刻画内容	常用方法 / 工具
Gv 几何模型	形状、尺寸、位置与装配关系，与 PE 保持时空一致	SolidWorks、3DMAX、ProE、AutoCAD、三维扫描仪
Pv 物理模型	在几何模型上叠加物理属性、约束与特征	ANSYS、ABAQUS、Hypermesh；结构、流体、电场、磁场仿真
Bv 行为模型	外部干扰与内部机制作用下的实时响应，含演化、功能与性能退化行为	有限状态机、马尔可夫链、神经网络、复杂网络、本体建模
Rv 规则模型	历史规律规则、隐性知识经验、领域标准准则，可自学习自演化	集成既有知识，机器学习挖掘产生新规则

四类模型组装、集成与融合后，经模型校核、验证和确认（VV&A）保证一致性、准确度与灵敏度；可借助 VR/AR 实现虚实叠加与融合显示。

02 概念与核心内涵

服务如何分层：底层功能支撑，上层业务交付

功能性服务 FService（内部支撑）

- **模型管理服务（面向 VE）：**建模仿真、模型组装与融合、模型 VV&A、一致性分析
- **数据管理处理服务（面向 DD）：**数据存储、封装、清洗、关联、挖掘与融合
- **综合连接服务（面向 CN）：**数据采集、感知接入、数据传输、协议与接口服务

业务性服务 BService（面向用户）

- **现场操作指导：**虚拟装配、设备维修维护、工艺培训
- **专业技术服务：**能耗仿真评估、控制策略自适应、动态优化调度、过程仿真
- **智能决策服务：**需求分析、风险评估、趋势预测
- **终端产品服务：**功能体验、虚拟培训、远程维修

对用户而言，服务是屏蔽内部异构性与复杂性的黑箱，以应用软件或移动端 App 提供标准输入输出，降低使用门槛、实现按需调用。

02 概念与核心内涵

孪生数据是模型的驱动，由五类数据融合而成

数据类别	主要内容
Dp 物理实体数据	实体属性数据（规格、功能、性能、关系）与动态过程数据（运行状况、实时性能、环境参数、突发扰动），由传感器、嵌入式系统、采集卡采集
Dv 虚拟实体数据	几何、物理、行为、规则模型相关数据，以及过程仿真、行为仿真、过程验证、评估、分析与预测等仿真数据
Ds 服务数据	功能性服务的算法、模型与处理方法；业务性服务的企业管理、生产管理、产品管理与市场分析数据
Dk 知识数据	专家知识、行业标准、规则约束、推理推论，以及常用算法库与模型库
Df 融合衍生数据	对前四类数据转换、预处理、分类、关联、集成、融合后得到；融合物理实况与信息数据，实现信息共享与增值

DD 是数字孪生的驱动；融合物理实况小数据与信息大数据后，可提供更准确、全面的全要素、全流程、全业务数据支持。

02 概念与核心内涵

六对连接把五个部分连成互联互通的整体

连接对	双向交互内容	典型协议 / 接口
CN_PD 实体—数据	采集 PE 数据送入 DD；处理后数据或指令反馈给 PE 优化运行	MTConnect、OPC-UA、MQTT、CoAP
CN_PV 实体—虚拟	实时数据更新校正数字模型；仿真数据转为控制指令下达执行器	与 CN_PD 方法协议类似
CN_PS 实体—服务	实时数据更新优化服务；服务结果经 App 由人工操作调控 PE	与 CN_PD 方法协议类似
CN_VD 虚拟—数据	仿真数据实时入库；读取融合、关联、生命周期数据驱动动态仿真	JDBC、ODBC 数据库接口
CN_VS 虚拟—服务	双向通讯，完成指令传递、数据收发与消息同步	Socket、RPC、MQSeries
CN_SD 服务—数据	服务数据实时入库；读取历史、规则、算法及模型支持服务运行优化	JDBC、ODBC 数据库接口

CN 实现 PE、VE、Ss、DD 之间的普适工业互联，是虚实实时互联与融合的基础。

02 概念与核心内涵

概念辨析：孪生与仿真、数字影子、数字线程

仿真

以数学模型离线推演物理规律；孪生强调与实体实时数据联动、双向闭环。

数字影子

数据由实体单向流向虚拟模型；孪生具备双向交互与反向调控闭环。

数字线程

贯穿全生命周期的数据贯通链路；孪生是具体对象的虚实镜像载体，二者互为支撑。

辨析要点：是否实时数据联动、是否双向闭环、是否覆盖全生命周期。

03 应用领域 · 总览

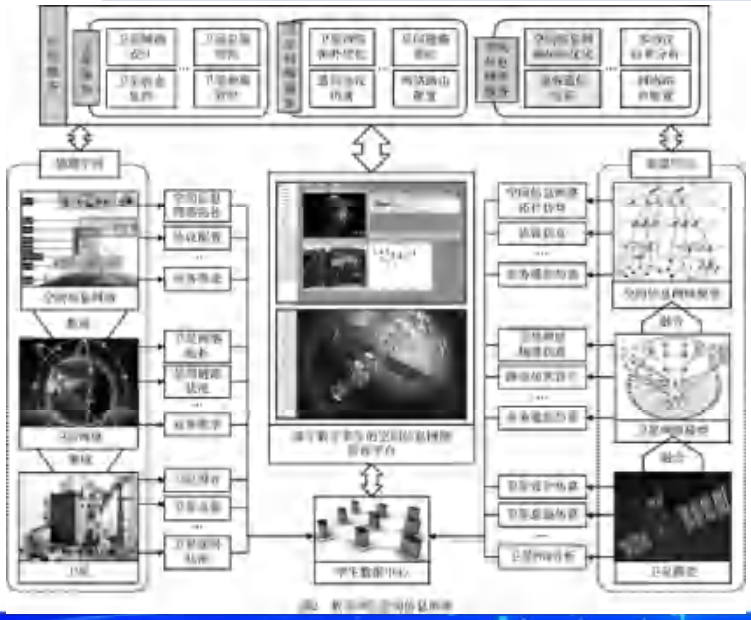
五维模型在十个领域分别解决什么问题？

航天 · 交通 · 海洋	能源 · 航空 · 装备	物流 · 民生 · 城市
• 卫星 / 空间通信网络 • 船舶全生命周期管控 • 车辆抗毁伤评估	• 发电厂智能管控 • 飞机起落架结构优化设计 • 复杂机电装备故障预测与健康管理	• 立体仓库 • 数字孪生医疗 • 数字孪生车间 • 数字孪生城市

• 其他潜力领域：石油天然气、农业、建筑、环境、安全等，如石油钻探远程监测、农场家畜跟踪与作物健康诊断、房屋建筑质量评估、水资源与森林资源优化管理等。

03 应用领域 · 第一组

航天、船舶、车辆：把孪生用于全周期管控与评估



卫星 / 空间通信网络

针对节点链路动态时变、时空行为复杂、业务差异大；按单元级卫星、系统级卫星网络、复杂系统级空间信息网络分层建模，实现全生命周期管控、优化组网与网络构建优化。

船舶全生命周期管控

面向设计能力落后、运维数字化水平低等问题，开展设计、制造、运维、使用一体化管控；孪生数据支撑知识库，多学科模型融合，高拟真仿真加快设计验证。

车辆抗毁伤评估

从材料、结构、部件、功能多维评价抗毁伤性能；以虚实双向真实映射替代高费用、低精度、置信度差的物理模拟毁伤，融合全生命周期、全要素、全业务数据。

03 应用领域 · 第二组

电厂、飞机、装备：从状态监控到健康预测维护

发电厂智能管控

面向长时运行、高温多尘工况，实现汽轮发电机组轴系可视化实时监控、大型转机在线精密诊断、地下管网可视化管理与三维作业指导；预警超速、断轴、轴承永久弯曲、烧瓦、油膜失稳等事故，并优化轴承设计、阀序开度与运行参数。

飞机起落架优化设计

起落架承受静态与动态高负载，垂直冲击载荷是疲劳损伤的关键因素，且影响因素相互耦合、机理建模难以建立精确模型；借助孪生数据预测冲击载荷，辅助起落架结构优化设计。

复杂机电装备 PHM

PHM 即故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management）。针对现有 PHM 模型不准确、数据不全面、虚实交互不充分的问题，先建立并校准五维孪生模型，比较实体与仿真参数一致性，分别识别渐发性与突发性故障。

03 应用领域 · 第三组

仓库、车间、城市：把孪生延伸到物流与空间治理



图10 数字孪生城市

立体仓库

针对调度效率低、利用率低、吞吐量不足；建立各设备五维模型，半实物仿真验证布局，支撑再设计优化、远程运维与共享立体仓库。

数字孪生车间

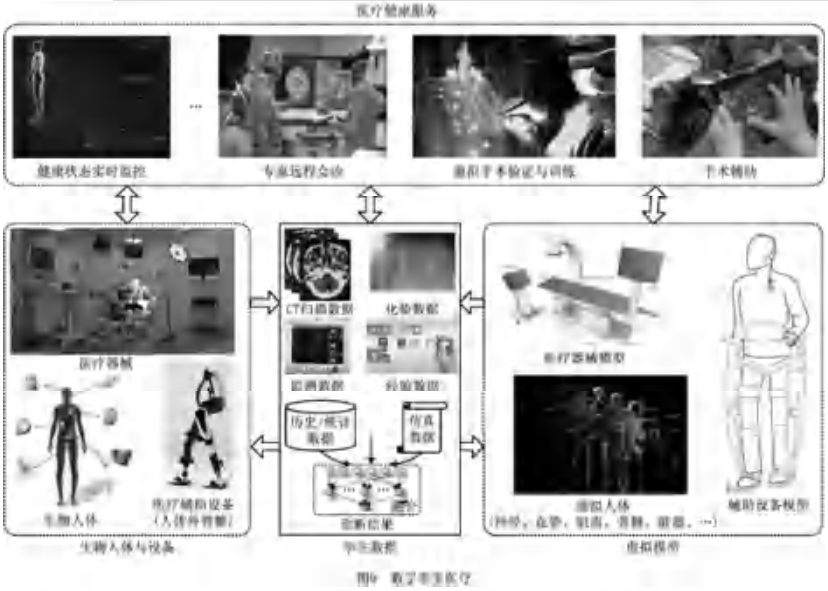
由物理车间、虚拟车间、车间服务系统、车间孪生数据及两两连接构成；融合数据驱动迭代运行与双向优化，实现管理、计划与控制最优，覆盖设备健康管理、能耗优化。

数字孪生城市

通过天空、地面、地下、河道传感感知物理城市，建模虚拟城市并汇聚城市大数据；支撑顶层设计、规划、建设、运营、安全、民生的协同化智能化管理。

03 应用领域 · 医疗

数字孪生医疗：为每个人建立可交互的虚拟人体



面向的医疗痛点

疾病预防不足、患者看病难、医生任务重、手术风险大，孪生成为改变现状的切入点。

系统组成与服务

- 生物人体：检测扫描仪器、可穿戴设备采集多源数据
- 虚拟人体：几何、物理、生理、行为模型复制人体
- 孪生数据：检测化验、虚拟仿真、历史统计数据融合诊断
- 健康服务：状态监控、远程会诊、虚拟手术训练、手术辅助

实时连接保证虚实一致性，提升诊断准确性与手术成功率；未来每个人都将拥有自己的数字孪生。

03 应用领域

十大行业领域与装备制造的三个落地层级

十大应用领域

卫星	船舶	车辆	电厂	飞机
装备	仓库	车间	城市	医疗

装备制造三个落地层级

单元级

零部件与单台装备建模、监测维护

产线级

工序协同、排产优化与过程管控

车间工厂级

车间运营管理、资源调度与全局决策

03 应用领域

覆盖设计、制造、运维全生命周期的落地场景

设计阶段

虚拟仿真验证与方案优化，研制前期暴露问题。

制造阶段

工序协同、过程管控与质量追溯，提升一致性。

运维阶段

实时监控、故障预测与健康评估，预测性维护。

智能矿山拓展

灾害预警、风险管控、救援支撑与生产调度优化。

多智能体工业应用

高炉流程工业孪生、大飞机多智能体离散制造方案。

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(1) 案例背景与研究对象

深部矿井智能化，呼唤设备状态的精准孪生感知

56%

一次能源消费中煤炭占比

10–20 m

矿井开采深度年均增加

>50 处

千米深井，最深约 1500 m

行业需求

- 走向少人化、无人化开采
- 政策推动矿井智能化升级
- 实时感知、预警与健康评估

现有监测局限

- 偏重信息获取与远程控制
- 缺机理模型，难测数据不足
- 人工检测及时性准确性受限

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(1) 案例背景与研究对象

MG210/485-WD 交流变频无链电牵引采煤机

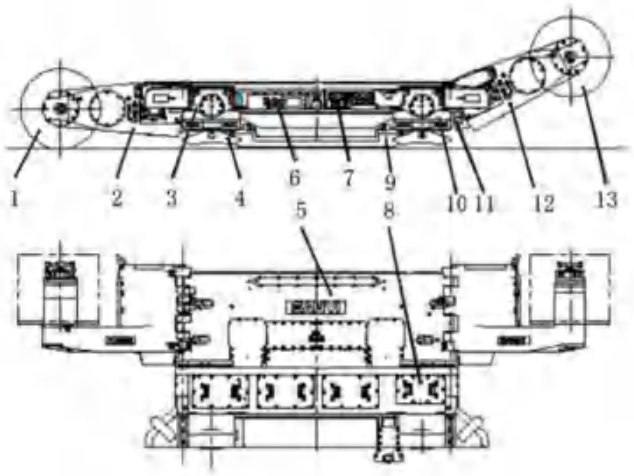


图 2-1 采煤机主要组成部分

适用工况与结构特征

- 煤厚 0.85~1.8 m，硬度 f≤4
- 倾角 ≤20°/45°，爬底板布置
- 电控、液压、喷雾三大系统

配套电机与液压系统

- 三相异步电机 1140 V / 50 Hz
- 调高系统最高压力 18 MPa

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(2) 机械孪生模型构建与验证

从机械建模到全生命周期管理的四步闭环

① 机械模型

SolidWorks 建模 MapleSim 建机械、液压与电机模型

② 实时监测

五维架构打通采集、映射、存储与服务界面

③ 健康评估

全寿命振动数据训练分段模型，预测轴承剩余寿命

④ 管理平台

SCADA 预警、RUL 平台与运行数据、产量预测

孪生闭环：物理实体 ↔ 孪生数据 ↔ 虚拟实体，模型与实物双向连接、迭代优化

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(2) 机械孪生模型构建与验证

SolidWorks + MapleSim 建模，模型误差控制在 5% 以内

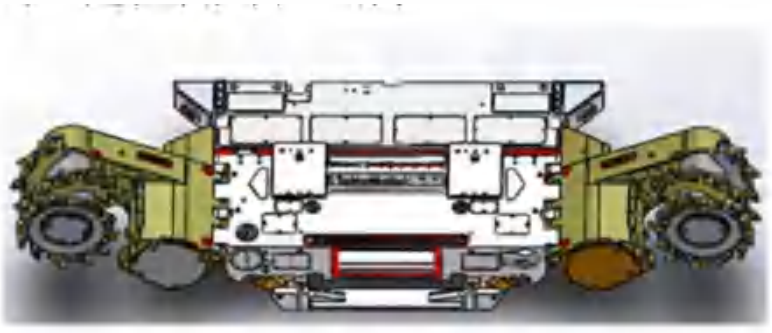


图 2-4 采煤机三维模型

建模步骤

- SolidWorks 建三维装配体
- 导入 MapleSim 建接口连接
- 九部分铰接副 + 平移副
- 电机库、液压库建模

模型可靠性验证

电流、转速误差均 <5%

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(3) 五维实时监测系统

基于陶飞五维模型构建采煤机孪生系统框架

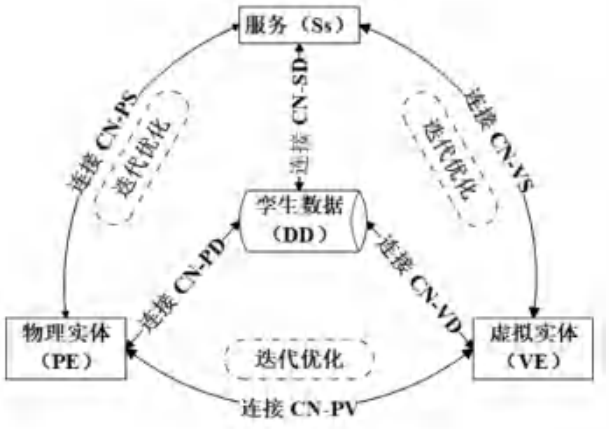


图 3-1 采煤机数字孪生五维模型

PE	物理实体：本体、传感器、摄像头与控制系统
VE	虚拟实体：模型封装 FMU 导入 Simulink 显示
DD	孪生数据：InfluxDB 时序库，清洗降噪
Ss	服务：实时孪生、预警、远程控制界面
CN	连接：实体、数据、服务双向连接优化

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(3) 五维实时监测系统

智能 I/O 与传感器系统打通采集与远程控制链路



图 3-5 传感器与控制系统

采集与感知

- I/O（CAN）采倾角、采高、速度、电流、瓦斯
- 传感器测倾角、位移、温度、振动、压力

数据与控制链路

上行 RTU→调节器→PC 入库；下行远程控制

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(3) 五维实时监测系统

模型封装进 Simulink，孪生角度拟合度达 0.98749

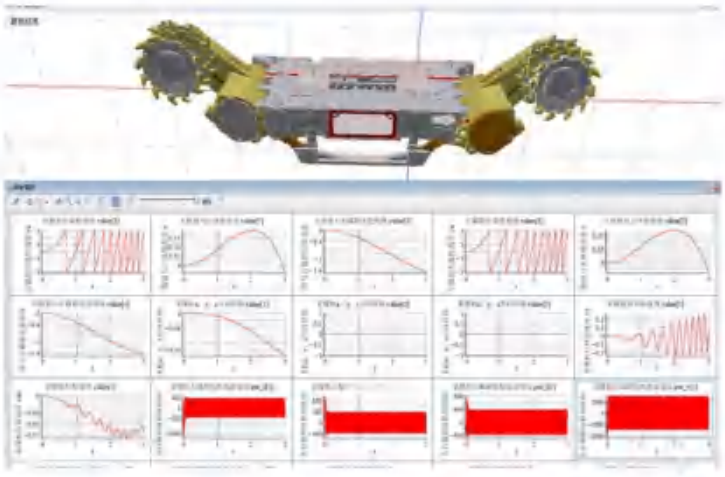


图 3-9 采煤机实时显示界面

±0.04°	角度误差
0.98749	角度拟合度
<0.2 s	数据延迟

虚拟实体构建链路

封装 FMU 导入 Simulink，Python 连接 Insight 显示

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(4) 轴承健康状态与剩余寿命评估

IMS 全寿命振动数据训练 LSTM / GRU 寿命模型

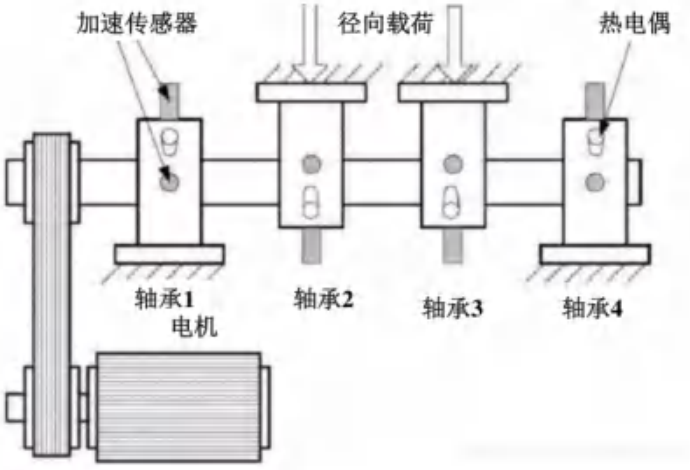


图 4-1 IMS 实验平台组成与简图

IMS 全寿命数据集

- 电机 2000 r/min，4 个双列轴承

LSTM 长短期记忆网络

三门结构，缓解梯度消失与爆炸

GRU 门控循环单元

两门结构，参数更少

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(4) 轴承健康状态与剩余寿命评估

降噪、特征提取与分段，构建融合健康指标

软阈值降噪 | 16 项时频特征 | Hilbert-RMS 分段 | 3:4:3 特征筛选 | PCA 融合指标

平稳期

0–816 样本点

衰退期

817–950 样本点

失效期

951–984 样本点

3:4:3 各选 5 特征，PCA 取 PCA1 融合指标

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(4) 轴承健康状态与剩余寿命评估

LSTM 误差更低，选为轴承剩余寿命模型

指标	LSTM	GRU
RMSE	0.0014	0.0026
MAPE	0.0889	0.1543

摇臂轴承运用精度

RMSE 0.0742
MAPE 0.0973

训练设置与结论

前 70% 训练 / 后 30% 测试；Adam，隐藏单元 100，dropout 0.5
学习率 0.001，迭代 500 次；LSTM 误差更低，选为寿命模型

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(5) 全生命周期健康管理平台

SCADA 监控预警 + RUL 平台集成健康管理界面



图 5-8 采煤机健康管理平台界面

SCADA 监控预警
电流温度瓦斯阈值

远程控制
总线连接启停急停

RUL 平台链路
模型算 RUL 输出

AI

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(5) 全生命周期健康管理平台

NARX 预测运行数据，GRU 预测采煤机产量

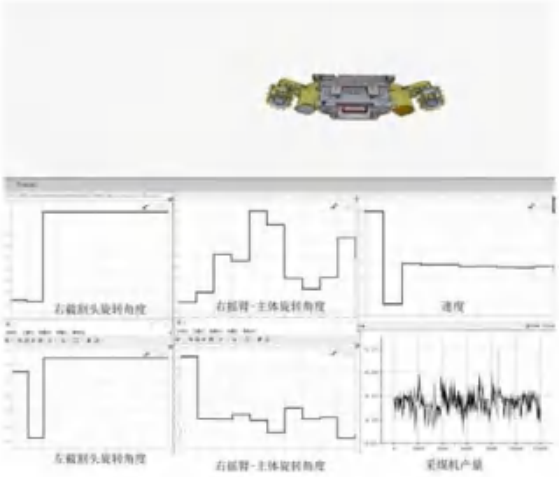


图 5-18 数据与产量预测

NARX 运行数据预测

- 5 组角度与牵引速度数据
- 60000 点，70% / 15% / 15% 划分

GRU 产量预测

RMSE 0.000494，MAPE 0.00467

训练 9 分 19 秒，快于 LSTM 26 分 12 秒

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(6) 案例总结、创新点与展望

建模—监测—评估—管理形成完整孪生闭环

1. SolidWorks + MapleSim 建机械模型，电流、转速误差 <5%
2. 五维框架打通实体、虚拟、数据、服务与传输
3. 分段 RUL 模型 LSTM 优于 GRU，RMSE 0.0742
4. 集成 SCADA、RUL 平台与 Tempo AI，预测 R 值接近 1

创新一 · 仿真叠加监测

创新二 · 分段寿命预测

04 案例1：基于数字孪生技术的采煤机运行状态监测与健康评估

(6) 案例总结、创新点与展望

从单机孪生走向工作面与整机健康管理

01
刚柔耦合建模
获取摩擦力、应力等难测力学数据

02
综采工作面孪生
纳入煤炭部分，覆盖整个综采工作面

03
整机与故障分类
扩展整机寿命预测，补充故障分类

案例价值：验证“机理建模 + 实时数据 + 神经网络评估”的数字孪生落地路径

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(1) 案例背景

装机规模持续扩大，被动运维难以为继

837 GW
2021 全球累计装机

约 20 年
机组长期运维周期

5 类
SCADA 可监测信号

行业驱动：双碳与新型电力系统双碳推动风电投入加大
- 孪生变被动运维为主动运维

传统被动运维的主要局限
- 事后救火，自动化程度低
- 监测滞后，缺仿真分析

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（1） 研究对象

1.5MW 永磁同步直驱式风力发电机组

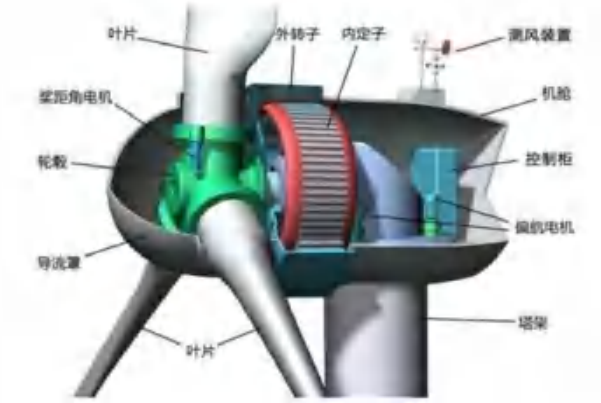


图 2.4 机组基本结构(直驱式传动，无齿轮箱)

属性	参数	单位
叶片长度	54	m
塔筒高度	96	m
切入风速	3	m/s
额定风速	9.5	m/s
切出风速	14	m/s
切入转速	6	rpm
额定转速	16.6	rpm
发电机额定转速	17.3	rpm

驱动链系统：机舱、变流器等传动部件

控制系统：传感器与相应执行机构

发电系统：变流器与辅助设备

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（2） MBSE系统建模

以 MBSE 三层递进完成需求到系统的设计

需求分析 → 功能设计 → 系统实现

运维现存不足

- 运行状态监测滞后
- 无法智能安排运维
- 缺仿真预估健康状态

系统主要功能需求

- 虚实映射统计发电量
- SCADA 动态显参数
- 设备运营备件服务

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（2） 总体架构

物理实体—数字端—数据库—应用服务四层孪生框架

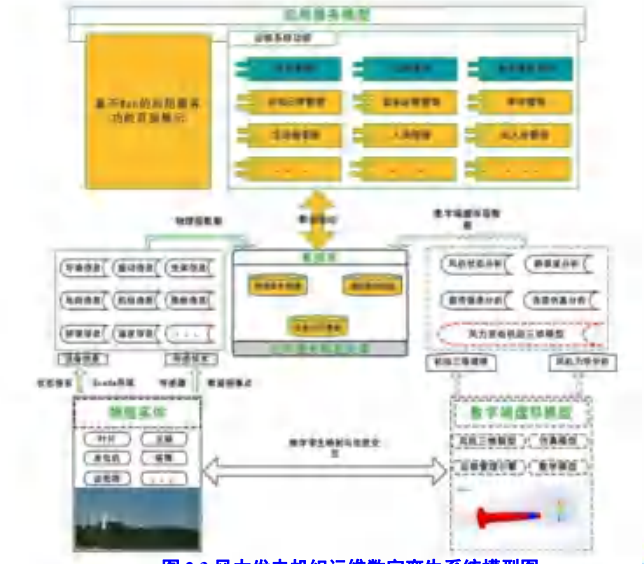


图 2.3 风力发电机组运维数字孪生系统模型图

物理实体

风机与传感器，采集叶片、主轴、塔筒、变桨、变流器、发电机等参数与环境信息，是孪生基础。

数字端模型

三维虚拟模型、数学模型与仿真模型（静强度、疲劳强度、RPA 连续仿真），实现多物理量映射。

数据库

存储实体运行数据、虚拟模型运行数据与运维服务数据，是连接三层模型的桥梁。

应用服务模型

运维管理引擎与系统软件，覆盖定检巡检、备品备件、人员与台账管理，以孪生与 SCADA 数据驱动。

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（3） 数字端模型

数字端模型：三维镜像 + 数学模型 + 有限元仿真



图 3.3 a 风力发电机组整体三维模型

三维虚拟模型

SolidWorks 参数化建模，由零部件到装配体逐级构建；作为实体镜像映射，保留装配约束与层级关系，宏观表达运行状态。

运行数学模型

Matlab/Simulink 搭建，以桨距角、叶轮半径、转速、风速为输入，输出机组转矩，模拟运行状态并提供状态参数。

有限元仿真模型

以主轴为例开展静强度与疲劳强度分析；数学模型与仿真模型借助 RPA 实现连续非实时运行，支撑虚实映射。

03 数学模型

以输出转矩为例建立风机运行数学模型

建模思路与关系式

以叶片桨距角、叶轮半径、转速、风速为输入，机组输出转矩为输出，在 Simulink 中搭建气动力与传动链模型。

输入功率：$P = \frac{1}{2}\rho S v^3$

输出功率：$P_m = C_p(\beta,\lambda)\,P$

输出转矩：$T_m = P_m/\omega$

在最佳叶尖速比 7.32、桨距角 2rad 基准下，令风速在 4–13 m/s 连续阶跃，仿真转矩变化并与理论曲线拟合，结果作为运行异常预警输入。

模型输入参数	取值
额定功率	1.5 MW
额定转速	16.6 rpm
空气密度	1.225 kg/m³
风机半径	42 m
额定风速	14 m/s
切入 / 切出风速	4 / 13 m/s
叶片桨距角	2 rad
最佳叶尖速比	7.32

Cp 为桨距角 β 与叶尖速比 λ 的相关函数

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(3) 主轴静强度分析

两极端工况下主轴工作应力均超许用应力

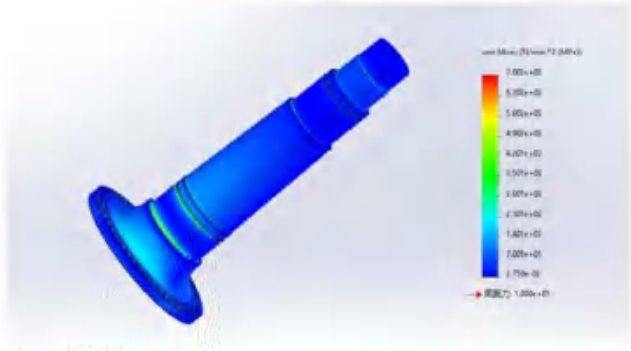
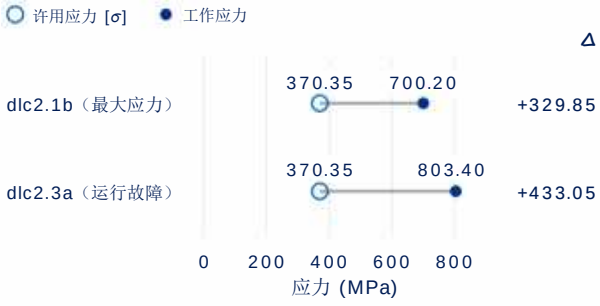


图 3.17 dlc2.1b 工况主轴静强度应力结果



材料与求解条件

材料 34CrNiMo6 | 弹性模量 210 GPa | 屈服极限 500 MPa | 泊松比 0.3 | 密度 7.83 g/m³；网格 20 mm，迭代 10^7 次

许用应力 [σ]=σs/γf，σs=500 MPa

判定结论

局部安全系数 γf=1.35，许用应力 [σ]≈370.35 MPa；两工况工作应力均超出许用值，主轴不满足极限强度，异常反馈孪生服务模型与运维人员。

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(3) 主轴疲劳分析

两工况寿命次数均低于 10^7 疲劳载荷临界

高周疲劳判定

失效循环次数高于 10^7，采用名义应力法（S-N）分析

累积损伤理论

雨流循环计数 + Palmgren-Miner 线性累积损伤评估剩余寿命

失效判据

累积损伤 D≤1 否则疲劳失效；安全系数按 GL 规范取值

载荷与 S-N

等效疲劳载荷为边界，周期 10^7，取 ASME 奥氏体钢 S-N 曲线

工况 dlc2.1b · 最大应力

43390 次

最薄弱点为连接叶轮轮毂的法兰盘处；可运行生命周期总数小于 10^7 载荷周期。

工况 dlc2.3a · 运行故障

99090 次

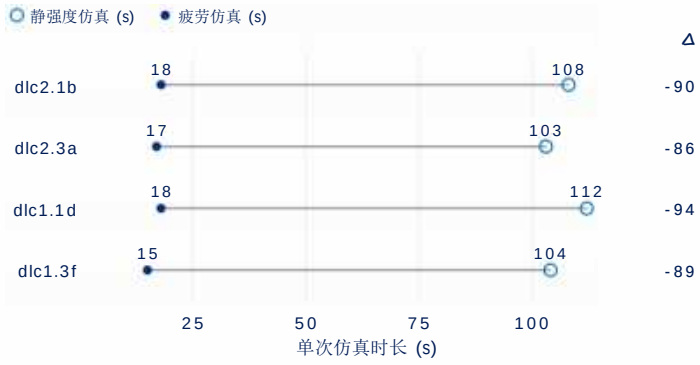
最薄弱点为安装滑动轴承的轴肩处；可运行生命周期总数小于 10^7 载荷周期。

两工况在 20 年 10^7 疲劳载荷作用下大概率出现疲劳失效

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(4) RPA连续分析

RPA 机器人驱动仿真模型连续非实时运行



工作逻辑：截图识别 → 操控键鼠

- 截取仿真软件界面，识别文字、形状与位置
- 按指令集模拟鼠标点击与键盘输入，衔接下一工况
- 图像处理：灰度化 → 均值滤波 → 二值化 → 锐化 → 边缘检测 → 文字分割

指令集：疲劳仿真 16 条、数学模型 12 条；覆盖建模、加载、求解与结果读取等操作。

仿真时长基线（表 2.2）

数学模型 Simulink 约 15.18 s；最长静强度 112 s，期间叶片约转 750°，难以实时同步。

RPA 的三点价值

连续非实时运行；无需模型降阶即可连续仿真、避免精度损失；规避降阶软件采购成本。

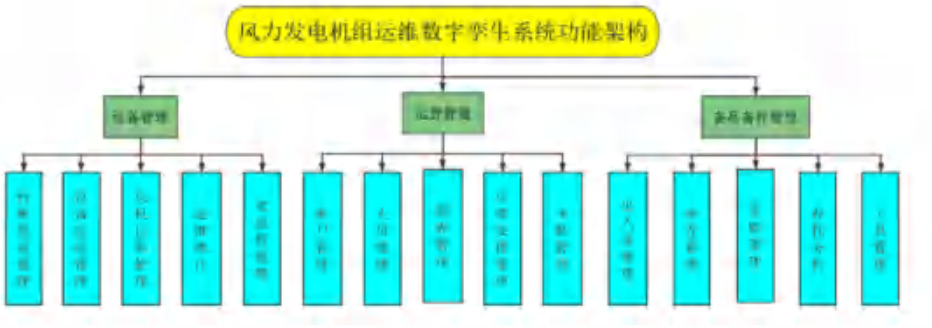
工况 dlc2.1b 最大应力、dlc2.3a 运行故障、dlc1.1d / dlc1.3f 正常运行

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(5) 运维管理引擎

三类角色权限下的三大模块十五项功能

运维监测人员 | 运维人员 | 审核人员 | 服务经营人员



数据库选型：MySQL

- 对比 Oracle、Sybase ASE、SQL Server 后选定
- 多用户并发表现良好、免费开源、跨平台
- 适配 B/S 架构 Web 应用
- 设计台账、验收、日常、点检、巡检、人员、出入库等 11 类基础数据表

设备管理

台账信息 · 设备验收 · 风机日常 · 运维统计 · 定巡检

运营管理

账户 · 人员 · 报表 · 运维安排 · 考勤 / 天气预报

备品备件管理

库存 · 采购 · 存耗分析 · 工具 · 出入库

图 4.13 运维数字孪生系统功能架构；四类角色按账户类别分配权限

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

(6) 原型系统架构

B/S 架构下的软硬件配置、RPA 仿真与功能实现

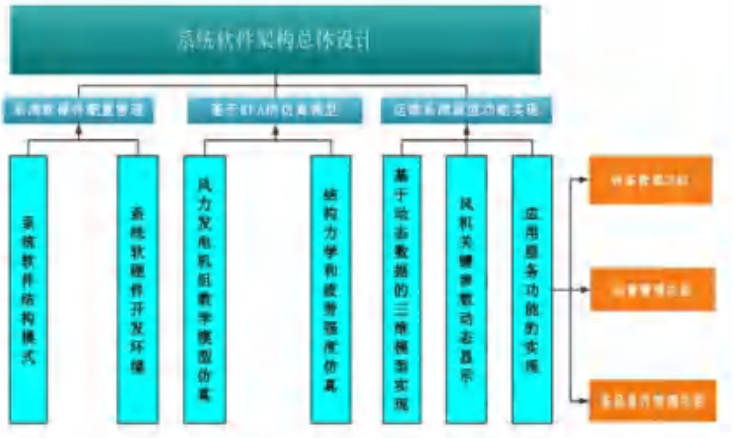


图 5.1 系统软件架构总体设计

软件架构三部分

软硬件配置管理 · 基于 RPA 的仿真模型 · 运维系统原型功能实现

选型：B/S 浏览器 / 服务器结构

仅需浏览器访问，不受场合与空间约束，扩展性良好；相较 C/S 结构选定 B/S。

开发环境与硬件配置

- 软件：Windows 10 专业版、VSCode 1.76.2、JavaScript ES5.1、Chrome 109.0.5414.120、Navicat Premium 15.0.13
- 硬件：Ryzen 5 3500X 6-Core 3.59GHz、16GB RAM、512G SSD、GTX 1650 SUPER

应用流程：浏览器登录 → 按账户类别配权限 → 连服务器与 RPA 仿真 → 连接 MySQL

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（7）原型界面

数字端数据驱动 与 SCADA 实时预警双界面



图 5.5 原型主界面：发电统计、温度与部件报警记录



图 5.8 SCADA 参数监测界面：状态、电气量、温度与曲线

数字端模型数据驱动

SCADA 采集入库 → 3D 引擎调用数据 → 驱动虚拟风机；可查近 6 日发电、发电时长、满发小时数、最大风速、机舱/发电机温度与部件异常。

SCADA 实时监测与预警

Node.js + Express 轻量服务器连接 MySQL 实时展示转速、电压电流、温度、桨距角与风况；异常点“关闭”发预警停机检修，正常后点“启动”。

仿真结果页连续输出主轴数学模型、静强度与疲劳三部分，以 RPA 仿真时间为周期

04 案例2：风力发电机组运维数字孪生系统关键技术研究

（8）结论与展望

研究结论与后续拓展方向

研究结论

1. 基于 MBSE 搭建系统模型架构、数字端模型与运维引擎模型
2. 完成三维建模、阶跃风速输入 / 转矩输出数学模型与主轴静强度、疲劳仿真
3. 基于 RPA 整理仿真软件操作指令集，支撑模型连续运行
4. 构建 MBSE 运维引擎，完成数据库选型与基础数据设计
5. 在 1.5MW 机组上实现运维数字孪生原型软件

研究展望

1. 补充叶片、轴承、套筒、变桨等其余部件的仿真模型
2. 拓展更多面向运维的应用服务功能
3. 借助已完成模型与基础代码，自动生成复杂源代码
4. 疲劳仿真由静载荷改为加入交变载荷作用
5. 完善 RPA 机器人调试，进一步保障连续稳定运行

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

（1） 案例背景与研究对象

传统运维为何难以满足机组可靠运行要求

水电是清洁可再生能源，对电网稳定与绿色低碳转型意义重大；随着电网负荷日益复杂，机组需更频繁参与调峰调频，性能、稳定性与检修难度被推向更高要求。

事后维护：故障发生后再处理

异常已造成损失才停机检修，无法挽回已发生的设备损坏与发电量损失，难以保障长期稳定运行。

定期维护：按固定周期检修

不区分机组实际状态统一安排检修，效率偏低，既可能过度检修，也可能漏检早期隐患。

运维方向：由被动维修转向基于真实状态的状态检修；数字孪生在虚拟空间映射机组全生命周期，为实时监控与健康评估提供新路径。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

（1） 案例背景与研究对象

案例研究哪一类机组、关注哪些信号



图 2-3　混流式水电机组三维结构（论文原图）

机组主要部件

- 水轮机：将水能转换为机械能
- 发电机：转子与定子输出电能
- 励磁系统：提供并调节磁场
- 尾水管：平顺排水、减少能量损失

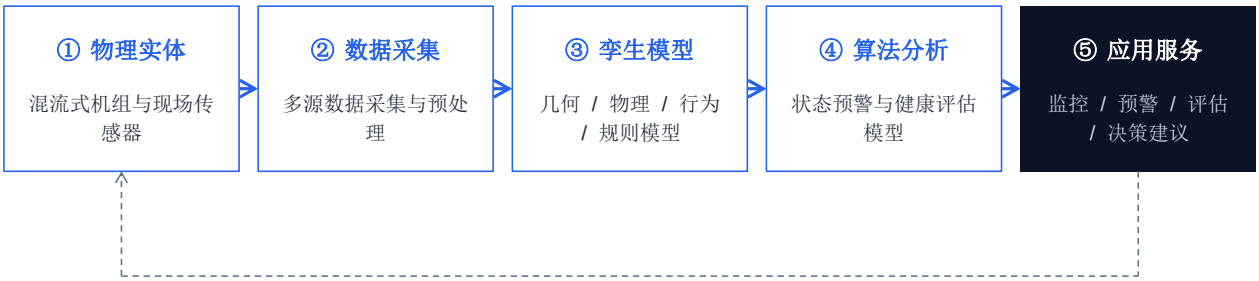
重点监测信号

以**振动、摆度**信号为核心建模对象；水头、有功功率、转速、流量作为评价机组样本的重要工况指标。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 数字孪生五维体系架构

数字孪生在本案例中如何形成闭环？



运维决策与状态反馈回物理机组，驱动持续优化

整条链路以数据和连接为核心：虚拟模型与物理机组动态同步，算法结果沉淀为可交互的运维服务，再反馈到现场。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 数字孪生五维体系架构

本案例的数字孪生由哪五个维度构成？

设备层	水轮机、发电机、励磁系统、尾水管及各类测点传感器
数据层	实时监测、几何装配、水力电气、规范经验及模型交互数据，经预处理入库
模型层	几何、物理、行为、规则四类镜像模型，与物理实体实时同步
应用服务层	实时监控、智能预警、健康评估与运维决策建议

连接交互

贯穿各层的数据通讯与虚实交互，保障实时同步与快速响应

水电机组数字孪生五维模型架构（图 2-2）。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 五维架构·设备层

设备层采集哪些状态量、测点如何布置？

监测类型	传感器与原理	测点布置与作用
相位监测	相位 / 霍尔式传感器	布置 1 个键相测点，监测机组相位变化
摆度监测	电涡流传感器（非接触、高精度）	共 6 个测点：上导、下导、水导各 X / Y 方向，测摆动幅度
振动监测	接触式低频速度传感器 / 非接触涡流传感器	上机架、下机架、定子机座、顶盖各 3–4 测点，测水平与垂直振动
温度监测	高精度热电偶 / 热电阻	定子绕组、空气冷却器及管路、推力与上导轴承多点布置
效率与工况	超声波 / 蜗壳差压法测流量；功率、转速传感器	在线监测流量、有功功率与转速，作为工况评价指标
位移 / 脉动	轴向位移传感器；压电式压力脉动传感器	测转子轴向移动；在蜗壳进口、无叶区、顶盖下方、尾锥处捕捉压力波动

测点数量与类型依据论文传感器布置方案整理。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 五维架构·数据层

数据层如何把多源异构数据整理成可用信息？

多源数据来源

- 传感器实时监测数据
- 机组几何与装配信息
- 水力与电气特性数据
- 行业规范与专家经验
- 虚拟模型数据、服务层与系统交互数据

预处理流程

① 消除噪声，提取有效信号

↓

② 处理缺失值，补齐数据缺口

↓

③ 平滑异常数据，抑制突变干扰

↓

④ 数据规范化，优化数据结构

处理后的数据持久化存储，保障一致性、完整性与可访问性，支撑历史分析、趋势预测与维护决策。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 五维架构 · 模型层

模型层用哪几类模型复刻机组、怎样建出来

四类镜像模型

- 几何模型：精确表示机组结构特征
- 物理模型：模拟材料属性与环境条件
- 行为模型：预测不同工况下的响应
- 规则模型：定义操作逻辑与维护标准

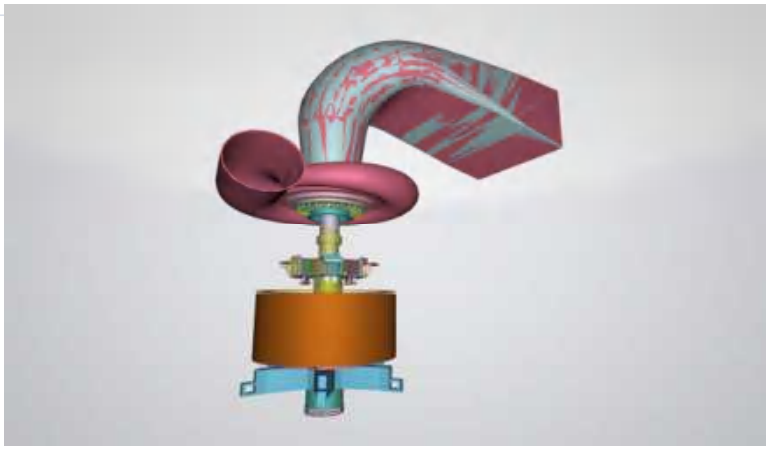


图 5-4　机组三维模型：SolidWorks 建模 → 3Ds Max 材质标注（论文原图）

建模流程：SolidWorks 完成初始几何建模，导入 3Ds Max 添加材质与部件标注，再搭建厂房三层环境，形成可实时同步的虚拟副本。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(3) 预警状态：KPCA-LSTM方法

预警模型如何从振动摆度信号识别异常并预测趋势

1　多源信号融合

对多路振动、摆度监测信号进行融合，形成统一分析样本

2　KPCA 核主成分分析降维

压缩特征、减少冗余，保留原始数据 90% 以上信息量

3　控制限判定异常

MSPC 多元统计过程控制按稳态工况设阈值，T^2、SPE 超限即判异常

4　LSTM 趋势预测

长短期记忆网络构建融合数据多步预测模型，预判未来运行状态

预测性能评价指标

决定系数 R^2
均方根误差 RMSE
平均绝对百分比误差 MAPE

统计量超出控制限即触发预警，记录预警类型、时间与情况说明。

KPCA 核主成分分析、LSTM 长短期记忆网络、MSPC 多元统计过程控制

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(4) 健康评估：模糊综合评判

健康评估怎样把运行状态量化成四个等级

1 建立指标体系

AHP 层次分析法搭建多层次评估指标体系

2 划分状态等级

按运维要求将机组状态分为健康、良好、合格、危险四级

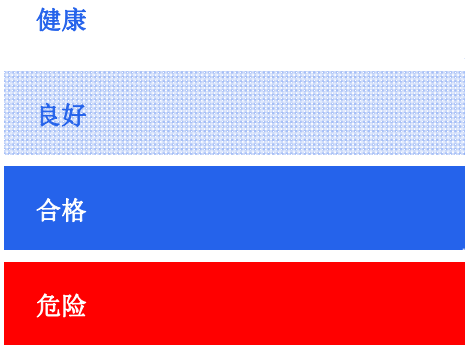
3 组合确定权重

熵权法定底层权重，灰色关联度法定中间层权重，合成组合权重

4 计算隶属度并定级

按数据分布构建隶属度函数，依最大隶属度原则判定状态

四级状态划分



AHP 层次分析法、熵权法、灰色关联度分析、多级模糊综合评估。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(2) 五维架构·应用服务层

孪生模型最终对外提供哪些运维服务

服务一	服务二	服务三	服务四
实时监控	智能预警	健康评估	决策建议
机组运行状态三维可视化，监测数据随采样频率动态刷新，直观呈现最新工况。	**基于 KPCA-LSTM 模型识别异常状态，超限触发提醒并记录预警类型、时间与说明。**	**融合历史与实时数据完成多级模糊综合评估，给出机组当前健康等级与维护指导。**	**综合监控、预警与评估结果，面向运维团队输出针对性检修与性能优化建议。**

应用服务层是孪生系统的最终目的：把模型与算法结果转化为运维人员可直接使用的监控、预警、评估与决策能力。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(5) 系统实现与案例成效

系统用什么技术栈把孪生架构落到可运行平台

层级	技术选型	作用
客户端	Unity3D	三维场景、GUI 界面与人机交互
服务端	C# / .NET Framework	数据处理与业务逻辑
算法层	Python；TorchSharp 加载 .pth	预警与评估模型计算
数据层	MySQL	运行数据持久化存储
通信	TCP 协议	面向连接、顺序可靠传输
建模工具	SolidWorks、3Ds Max	机组与厂房三维建模

系统设计原则

- **实时性**：虚实数据同步，高频低延时刷新
- **可靠性**：数据准确一致，抗干扰与容错
- **可扩展性**：预留接口，便于模块升级
- **安全性**：加密、权限控制与访问审计
- **功能完整性**：覆盖采集、交互、分析与管理

总体设计（表 5-1 运行环境与开发工具、图 5-3 系统架构）；系统采用客户端-服务器（C/S）架构。

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(5) 系统实现 · 虚实交互

虚拟模型怎样跟着真实机组动起来

动态映射与碰撞检测

- 转速映射为模型绕主轴旋转，振动摆度映射为多方向平移
- C# 脚本读取并应用实时数据，循环迭代驱动模型
- Rigidbody 与 Mesh Collider 做碰撞检测，防止部件穿模

主要交互功能

机组预警、机组拆解、健康评估、场景漫游、决策建议；监测折线图每秒动态更新，横轴保留 10 分钟趋势。

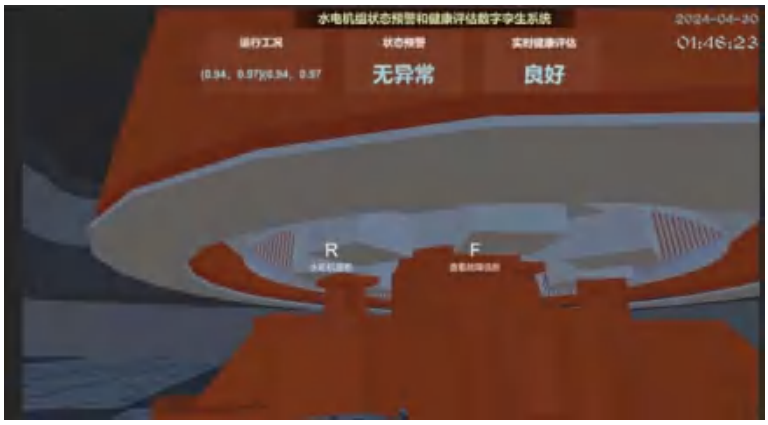


图 5-14 虚拟空间内机组故障查看与拆解视角（论文原图）

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(5) 系统实现与案例成效

这套孪生系统在实际运维中取得了哪些成效

主要成效

- **数据降维提效**：KPCA 压缩后保留 90% 以上信息量，信息处理量显著下降
- **异常提前预警**：T^2、SPE 统计量超限即触发提醒，识别振动摆度异常
- **状态量化分级**：模糊综合评估给出健康等级，实测数据验证评估合理性
- **运维效率提升**：融合数据、分析与可视化，实现机组状态实时预警与评估

降维与信息量数据取自论文 KPCA 模型分析结果。



图 5-13　统计量超限后触发状态预警提醒（论文原图）

04 案例3：水电机组状态预警与健康评估数字孪生运维系统

(6) 案例小结与迁移

这个案例可以迁移出哪些数字孪生落地经验？

全生命周期映射

以物理实体、虚拟模型、数据、服务与连接五个维度，构建与机组实时同步的孪生体。

数据—模型—算法—软件融合

传感器数据驱动模型，预警与评估算法沉淀为平台上可交互的应用服务。

虚实闭环运维

监控、预警、评估到决策建议形成闭环，结果反馈现场，驱动运维持续优化。

适用边界与展望

本案例聚焦机组运维阶段；后续可结合深度学习、语义大模型与数据生成模型进一步拓展孪生能力。

案例对象：混流式水电机组 · 关键词：状态预警、健康评估、数字孪生、深度学习

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（1）研究背景

水下液压装备复杂度高，故障诊断受限于样本与数据

现代工程系统结构日趋复杂，传统故障检测模型的精度与可靠性面临挑战；深水液压装备长期处于受限、难维护环境，故障样本采集困难，难以支撑高精度数据驱动诊断。

传统智能故障诊断

依赖人工特征工程与专家经验提取故障特征。

- 模型性能依赖大量标注故障样本
- 水下环境受限，现场故障数据难获取

深度学习诊断路线

RNN、GAN、CNN 等可自动从信号中提取特征。

- 故障数据不足仍是主要瓶颈
- **模型精度与鲁棒性受数据量**、数据质量约束

数字孪生补数据思路

DT 由物理实体、虚拟模型、连接、数据、服务五维构成。

- 生成仿真故障数据，与真实数据融合扩充样本
- 在数据稀缺条件下支撑可靠的诊断建模

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（1）研究思路

面向复杂水下液压装备，提出孪生辅助诊断三环节方案

研究缺口：现有数字孪生研究多面向结构相对简单的系统；复杂水下液压装备建模难度大、虚实数据融合要求高，尚缺将数字孪生与先进数据融合方法系统结合、面向诊断的完整方法框架。

01

双向数据一致性评估机制

评估不同数据源间的相关性，提升虚实数据匹配度、孪生模型可靠性与诊断精度。

02

参数校准 + 2DSW 孪生建模

调整虚拟模型参数，并以二维信号扭曲算法对齐虚实信号，提升生成故障数据的质量。

03

MC1DCNN-GRU 诊断模型

一维卷积提取时序特征、GRU 捕获长期依赖，更适配虚实结合的训练数据库。

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（2）研究对象

水下防喷器（BOP）双冗余液压控制系统实验平台

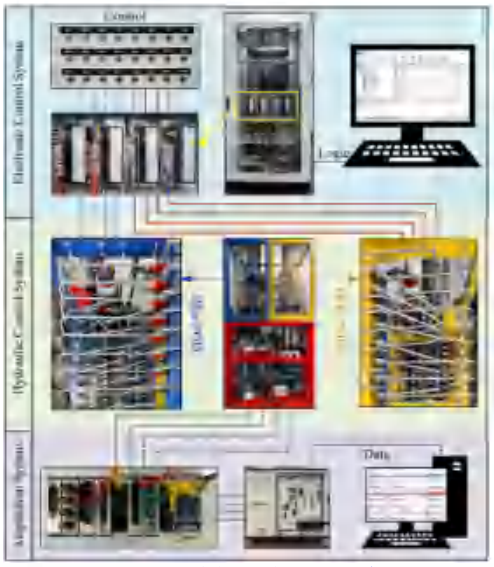


图 7 水下 BOP 控制系统实验平台（电控 / 液压 / 采集三层）

系统定位与复杂度

BOP 是保障深水钻井安全的关键装备；其控制系统为复杂机电液复合系统，全过程采用冗余设计，数据量大、故障特征识别困难。

三大组成与双冗余回路

含电子控制系统、液压控制系统与传感器系统；蓝箱、黄箱（Blue/Yellow POD）双冗余，各自独立完成全部功能，回路分高压蓄能器回路与低压锁紧回路。

案例工况设置

实验平台以 HYSY981 钻井平台 BOP 控制系统为原型；通过手动阀与更换故障部件，模拟 6 种常见故障并叠加 1 种正常工况，共 7 种运行状态用于诊断验证。

硬件环境 Intel i7-10700K 3.8GHz / 32GB DDR4 / RTX 3080

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（2）方法框架

三阶段方法：虚实数据生成 → 一致性融合 → 孪生诊断

阶段一 · 数据生成（Transfer）

由实验对象采集真实数据；经 Modelica 建模与虚拟测试，仿真实验生成虚拟数据。

阶段二 · 虚实融合（Fusion）

标准化与特征提取后做一致性验证；不达标进入优化，达标后形成孪生数据。

阶段三 · 模型诊断（Diagnosis）

孪生数据驱动 MC-1DCNN 与 GRU 联合模型，输出故障类别与诊断结果。

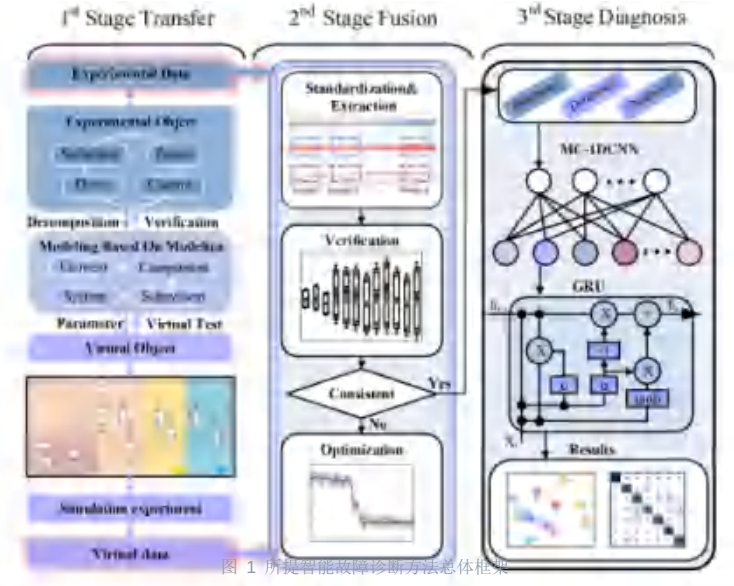


图 1 所提智能故障诊断方法总体框架

Fig. 1. Framework of the proposed IFD method.

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（2）虚拟建模

Modelica 分层建模：从元件到系统，叠加故障生成虚拟数据

面向对象的多域建模语言

Modelica 开放、物理一致、可扩展，适合机械、电气、流体多域耦合建模；部件与子系统可在不同系统间复用，提升建模效率与可靠性。

层级分解结构

按 元件 → 部件 → 子系统 → 系统 分解：液压控制系统分为动力、切换、控制、驱动子系统；驱动子系统再分阀、缸等部件，阀部件分动态功能、端口等元件。

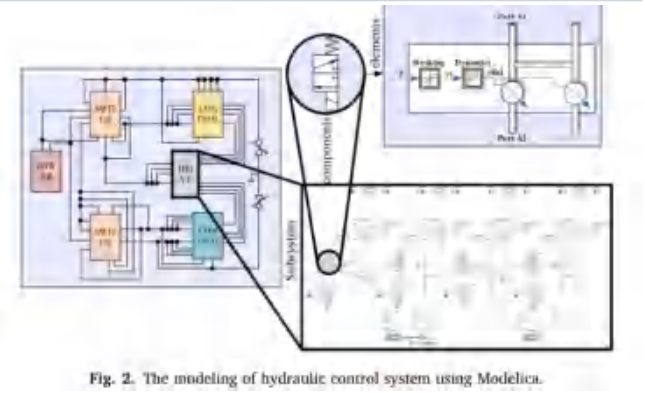


Fig. 2. The modeling of hydraulic control system using Modelica.

图 2 基于 Modelica 的液压控制系统建模层级

故障注入与虚拟数据生成流程

设定输入参数 Φ=[P,Q,V,...,T] → 设定时间步长 → 施加故障条件 → 运行模型 → 未到终时继续更新并记录输出 → 形成虚拟数据 → 2DSW 对齐优化

先在正常工况建模，再叠加故障条件生成仿真数据

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（2）一致性校验

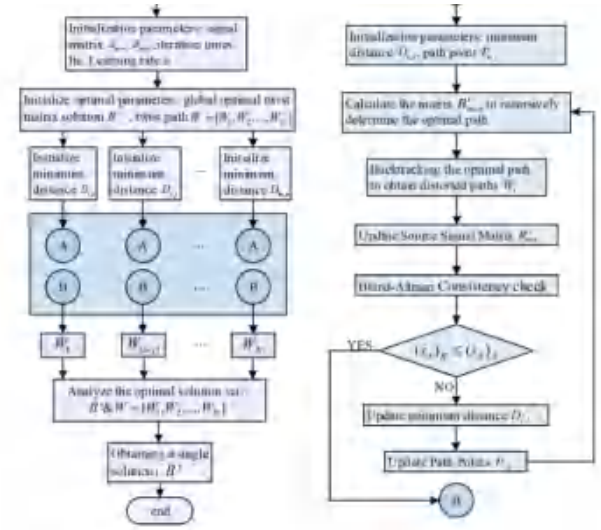
双向一致性评估 + 2DSW 扭曲，把虚拟数据对齐真实数据

2DSW 二维信号扭曲原理

扭曲点网格覆盖模板，交点分主动 / 被动扭曲点，主动点移位调整模板；以归一化欧氏距离度量差异，虚拟数据为源信号、真实数据为目标信号，动态规划求解最优扭曲路径。

BDCE 一致性评估闭环

- 预处理：去噪、标准化、特征提取，统一比较尺度
- DTW 初步时间对齐，2DSW 进一步弯曲调整时间与幅度
- MSE 量化虚实误差，迭代校准模型参数与仿真算法
- 时间差与幅度差降到阈值内，即判定为孪生数据



虚拟模型定期由真实数据校准，双向链路非实时但可靠，首次将 DT 与 2DSW 结合校准虚拟模型

图 5 虚实结合的双向数据一致性评估框架流程

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（2）诊断模型

MC1DCNN-GRU：卷积提时序特征，门控循环抓长期依赖

输入与训练数据来源

输入压力、流量信号，输出系统状态标签；训练数据来自物理原型、Modelica 虚拟模型与 2DSW 优化数据三类来源。

双模块分工

MC1DCNN 经卷积、池化提取时序特征；GRU 递归更新隐状态，捕获序列长期依赖，最终由全连接层完成故障分类。

Swish 激活函数

$f(x) = x \cdot \sigma(\beta x)$ 克服 ReLU 负输入零输出局限，下界有界、上界无界、平滑且非单调。

含重置门、更新门、候选隐状态与隐状态递归更新

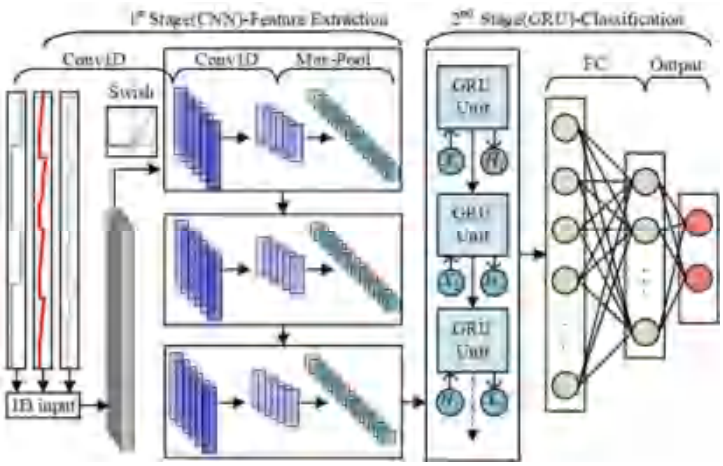


图 6 MC1DCNN-GRU 联合模型结构（特征提取 → 分类）

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（3）实验配置

七类工况与三类数据集，构成虚实结合训练样本

标签	故障 / 运行工况	A / B / C 样本
1	正常工况 Normal	1200 / 1000 / 1000
2	蓄能器液压泄漏	1200 / 1000 / 1000
3	泵泄漏 Pump leakage	1200 / 1000 / 1000
4	比例阀阀芯卡滞	1200 / 1000 / 1000
5	旁通电磁阀泄漏	1200 / 1000 / 1000
6	6000	1000

六类虚实配比（Table 3）
Type1 A:C=1000:4000 · Type2 A:C=2500:2500 · Type3 A:B=2500:2500 · Type4 纯 A 5000 · Type5 纯 B 5000 · Type6 纯 A

虚拟模型仅对应实验已模拟故障，未模拟与实验不同的新故障

三类数据集

- A 真实实体原始数据，含噪声与异常
- B 虚拟模型数据，故障参数化为工作区变量
- C 经 2DSW 优化 A、B 生成的孪生数据

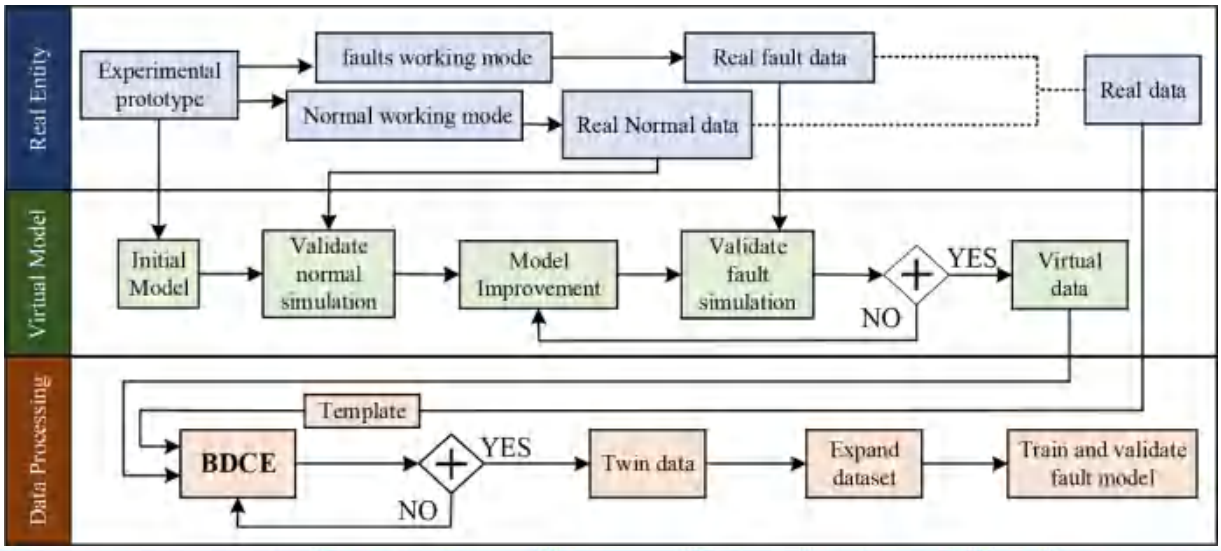
采集与采样参数

- 4 液压 + 2 流量传感器，分置蓝、黄箱
- 采样 1024 Hz，样本时长 8 s
- 共 8400 组，每状态 2 液压 + 1 流量

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

(3) 数据集与数据流

虚实样本构成与完整数据流



04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

(4) 结果验证

虚拟模型通过接口变量验证，优化后数据误差降约 38.41%

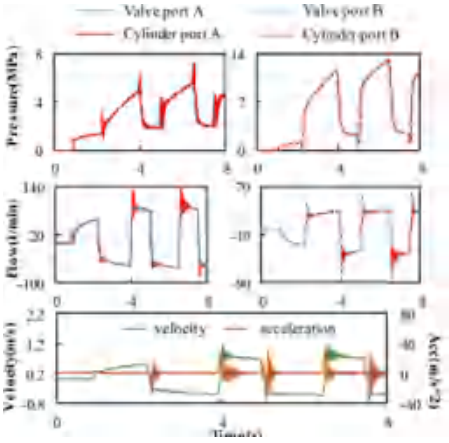


图 10 虚拟模型关键接口变量仿真结果

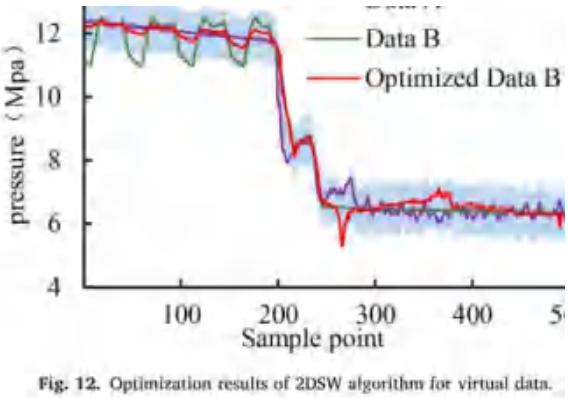


Fig. 12. Optimization results of 2DSW algorithm for virtual data.

图 12 2DSW 算法对虚拟数据的优化结果

模型正确性：阀 / 缸口压力、流量与速度加速度曲线一一对应

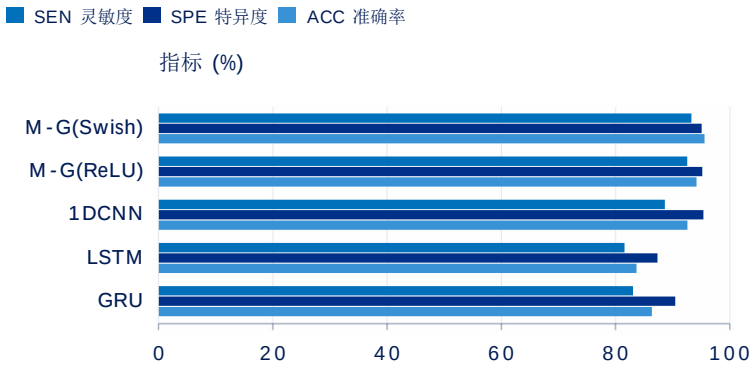
一致性提升：200 样本 MSE 较传统方法降低约 38.41%

未优化虚拟数据与真实数据均值 / 方差差异显著，BA 一致性评估显示优化后一致性与可靠性更高

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（4）方法对比

MC1DCNN-GRU 准确率领先，Swish 激活优于 ReLU



联合模型准确率最高

M-G(Swish) ACC 95.62%，Precision 99.76%，Hamming 4.38%

激活函数对比

Swish 较 ReLU 精度提升，计算时间基本持平

虚实融合的优势

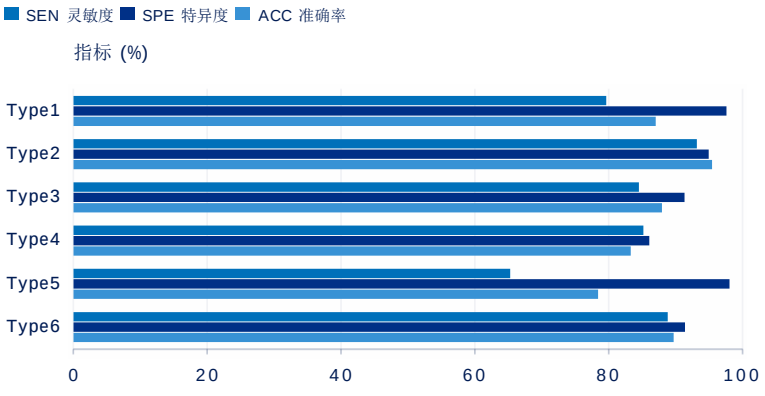
LSTM / GRU 计算快但精度落后；孪生数据随真实数据更新

Dataset A 随机 4900 训练 / 2100 测试，各方法运行 10 次取平均；M-G 指 MC1DCNN-GRU

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

（4）配比对比

虚实 1:1 孪生配比表现最优，灵敏度特异度更均衡



Type2 综合最优

A:C=2500:2500，ACC 95.62%，SEN 93.33% / SPE 95.11%

配比失衡的代价

纯虚拟 Type5 灵敏度仅 65.38%，需在 SPE 与 SEN 间平衡

孪生数据补样本

2DSW 优化数据训练较纯真实 Type4 精度提升 12.5%

指标 SEN 灵敏度 / SPE 特异度 / ACC 准确率，六类数据集虚实配比见前页 Table 3

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

(5) 结论与展望

孪生辅助框架在稀缺数据下仍稳健，诊断准确率达 95.62%

38.41%	95.62%	+12%
2DSW 优化后虚拟数据 MSE 较未优化降低幅度	MC1DCNN-GRU 诊断准确率，相近条件现有方法 <93%	稀缺 / 不完整数据条件下的准确率提升幅度

方法闭环与工程价值

BDCE 双向一致性评估保证虚实数据紧密融合，2DSW 算法优化虚拟数据质量，MC1DCNN-GRU 增强故障诊断能力；框架可扩展、可靠性强，为复杂工程系统的预测性维护提供了一条可落地的孪生辅助方案。

数据为 200 样本 MSE 对比、2100 组测试集平均准确率及稀缺数据提升幅度

04 案例4：数字孪生辅助的液压系统智能故障诊断方法

(5) 结论与展望

面向恶劣水下环境，补强高保真仿真与强噪声信号分离

现有局限：本研究以实验室原型与仿真数据为主，相对现场水下 BOP 忽略了恶劣环境与强噪声影响；虚拟模型目前只覆盖实验已模拟的故障类型，尚未包含与实验不同的新故障。

方向一 · 高保真环境仿真

研究面向恶劣环境的水下液压系统高保真仿真方法，把深水温度、压力、腐蚀与工况波动等因素纳入虚拟模型，提升孪生模型对真实系统的映射能力。

方向二 · 强噪声信号分离

研究强噪声背景下的有效信号分离方法，从受污染的压力、流量信号中提取故障特征，保证诊断模型在高噪声水下现场依然可用。

后续验证：采集实际水下部署设备的运行数据进一步检验模型；孪生数据基于真实数据持续更新，帮助诊断模型适应新环境与新工况。

未来计划获取实际水下部署设备数据做进一步验证

04 应用案例小结

四类典型装备的孪生实践：贯通监测预警—健康评估—运维平台

四案例同属装备运维阶段落地，技术链条一致：物理实体—虚拟模型—孪生数据—算法模型—服务平台闭环。

采掘装备 | 采煤机
实时状态监测与轴承剩余寿命预测。

新能源装备 | 风力发电机组
MBSE 建模、仿真与运维引擎原型。

水力装备 | 水电机组
状态预警、多级健康评估与孪生运维平台。

海洋工程装备 | 液压系统
孪生数据优化与深度学习故障诊断。

04 应用案例小结

案例一、二：采掘装备监测预测与新能源装备运维孪生

案例一 · 采煤机监测评估
对象：采煤机及摇臂轴承
孪生建模： MapleSim 建模，Simulink 接入，OPC 互联存储。
算法模型： LSTM 轴承剩余寿命预测，RMSE 0.0742。
平台成效： 健康管理平台实时监控、预警与控制。

案例二 · 风机运维孪生
对象：1.5MW 永磁同步风机
孪生建模： MBSE 架构，三维、数学与有限元强度仿真。
关键技术： RPA 实现模型连续运行，配套运维引擎。
平台成效： 开发运维孪生原型软件，验证可行性。

04 应用案例小结

案例三、四：水电装备预警评估与液压系统智能诊断

案例三 · 水电机组预警评估

对象：水电机组

孪生建模： 五维模型架构，Unity3D 虚拟环境与界面。

算法模型： KPCA 监测、LSTM 预警，多级健康评估。

平台成效： 孪生运维系统预警、评估并发布应用。

案例四 · 液压系统故障诊断

对象：水下防喷器液压系统

孪生建模： Modelica 模型，数据一致性评估与信号优化。

算法模型： 多通道一维 CNN-GRU，提取时空特征诊断。

平台成效： 诊断准确率 95.62%，支撑预测性维护。

05 发展趋势 · 未来十大展望

未来十年数字孪生的十大发展方向

01 融合人工智能，向数智孪生演进

02 从数字孪生到数字孪生工程

03 与具身智能融合，加速物理 AI 落地

04 与空间智能结合，成为元宇宙基础

05 量子计算助力实时孪生服务应用

06 脑机接口推动交互模式直接深入

07 危极特恶场景进一步彰显孪生价值

08 芯载孪生拓广数字孪生应用边界

09 标准体系完善，话语权竞争加剧

10 数字孪生通用软件平台将出现

从与新兴技术融合、未来应用场景、标准与工具等维度，探索未来十年数字孪生的演进方向。

05 发展趋势 · 技术融合

数智孪生、数字孪生工程与具身智能

01 融合人工智能，向数智孪生演进

AI for Digital Twins：人工智能全面赋能孪生本体，使物理实体、虚拟模型、连接交互、数据与服务具备感知、生成、交互、分析与决策智能，由数字镜像演进为具备内源智力的智能体。

Digital Twins for AI：孪生构建高保真、可编程虚拟环境，支撑 AI 训练、验证与进化，形成“虚拟—现实”持续学习闭环；二者相辅相成，构成双向赋能的数智孪生。

02 从数字孪生到数字孪生工程

面向大规模系统性应用，需补齐全生命周期贯通、模型数据持续积累、要素全生命周期管理与多对象全局协同；与系统工程方法结合，融合 MBSE 优势，统筹复杂产品/系统数字交付、性能管控、体系优化与智能升级。

03 与具身智能融合，加速物理 AI 改造现实世界

孪生为具身智能提供高保真、低成本、易迭代的试错环境与可信模型；具身智能作为物理执行器，赋予孪生装备自主行动、自我审视与自适应进化能力，共创感知—认知—决策—执行闭环的自治能力。

05 发展趋势 · 前沿融合

空间智能、量子计算与脑机接口

04 与空间智能结合，成为未来元宇宙核心基础

元宇宙强调“以虚拓实”，需要孪生具备理解与塑造复杂空间关系的高级智能；空间智能使孪生深度理解人、机、环境的关联与行为逻辑，构建遵循物理规律又支持虚拟创造与动态推演的世界模型，为元宇宙提供可靠可扩展的现实映射基础。

05 量子计算助力实现实时数字孪生服务

复杂模型仿真计算量可达千亿量级，传统架构全状态仿真耗时数周至数月；借助量子并行性、叠加性与全局寻优，构建量子—经典混合协同计算范式，突破超实时仿真能力，支撑装备健康预测维护、能源全局调度、新药分子模拟等高时效场景。

06 脑机接口使人与孪生交互融合更直接深入

脑机接口建立大脑与系统的直接通信链路，支持意念操控虚拟模型、调用服务并下达指令；反馈多维数据可转化为大脑易理解的形式，实现无损信息传递。交互模式由“感官交互”进阶为“脑机交互”，人由界面操作者转变为系统内在参与者。

05 发展趋势 ·场景与形态

危极特恶场景拓展与芯载孪生新形态

07 危极特恶场景应用进一步彰显孪生价值

危险任务：核设施运维、深海装备作业、危化品事故处置等人员高风险作业

极限尺度：原子级制造微观尺度，到大飞机、卫星互联网、超大型水利工程宏观尺度

特殊需求：太空在轨制造、精密脑科学研究等

恶劣环境：航发极端高温高压、极地超低温、电子对抗强干扰、火灾等条件

此类场景人员难抵达、操作成本高、安全风险大；高保真虚拟空间可实现先期预演、动态优化与智能决策。

08 芯载孪生拓广数字孪生应用边界

将高保真模型、轻量化仿真与智能算法内嵌智能芯片，实现感知决策执行本地化、模型数据个异化、服务功能个性化，缩短交互距离、提升响应与可靠性，支撑深空深海装备与小型移动装备灵活部署。

05 发展趋势 ·标准与工具

标准体系竞争与通用软件平台崛起

09 标准体系完善，话语权竞争激烈

已发布概念术语、参考架构、成熟度模型等基础共性与关键技术标准；工具/平台、测评、安全标准仍存空白，关键技术标准覆盖不全。

未来标准竞争是产业与技术竞争的关键要素，需抢占标准制高地，促进行业、国家、国际标准研制衔接与转化，构建引领性自主标准生态。

10 通用软件平台将出现

现有工具多面向特定功能或孤立场景，功能分散、互操作性差、重复开发，制约规模化应用。通用平台提供标准化、模块化开放架构，统一模型格式、数据标准与接口规范，兼容集成多源工具，覆盖建模、数据融合、仿真推演到协同决策全链路闭环，降低开发门槛、复用已有成果。

标准与工具共同构成数字孪生生态的底座：标准掌握话语权与主导权，通用平台降低落地门槛、支撑各行业快速推广。

05 发展趋势 · 结束语

五个维度的范式演进，汇聚为新质生产力

数字孪生	→	数智孪生 · 数字孪生工程
感官交互	→	脑机交互
经典计算	→	量子计算
机载 / 云端部署	→	芯载孪生
常规场景 / 标准填补 / 专用工具	→	极限环境 · 生态构建 · 通用软件

需汇聚各界优势，推动跨学科、跨领域协同创新，在智能制造、航空航天、智慧城市等深度实践中提升解决复杂系统问题的核心能力，加速形成支撑高质量发展的新质生产力。

总结与致谢

数字孪生赋能装备制造业数字化转型的脉络与方向

01 起源：始于航天工程，经概念提出、应用萌芽到行业渗透

02 内涵：五维模型虚实融合、数据驱动、服务按需交付

03 应用：十大领域概览与装备制造三层级落地

04 案例：四类装备贯通监测预警、健康评估与孪生运维平台

05 趋势：向数智孪生、多智能体协同与工程化平台化演进

恳请批评指正，谢谢！