

6-20-2023

## Application of Digital Twin in Digital Transformation of Thermal Power Units

Ze Dong

*Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation North China Electric Power University Baoding 071000 China; School of Control and Computer Engineering North China Electric Power University Beijing 102206 China, dongze33@126.com*

Wei Jiang

*Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation North China Electric Power University Baoding 071000 China; School of Control and Computer Engineering North China Electric Power University Beijing 102206 China*

Xiaoyan Wang

*Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation North China Electric Power University Baoding 071000 China, wxyncepu@126.com*

Lei Liu

*North China Electric Power Research Institute Co. Ltd Beijing 100043 China*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Overview is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Application of Digital Twin in Digital Transformation of Thermal Power Units

## Abstract

A new state estimation algorithm is proposed to improve the accuracy to obtain the optimal state estimation of distribution network against FDI attack. In the case of phasor measurement units being attacked and the measurement results being altered *the optimal Kalman estimate can be decomposed into a weighted sum of local state estimates*. Focusing on the insecurity of the weighted sum method *a convex optimization based on local estimation is proposed to replace the method and combine the local estimation into a secure state estimation*. The simulation results show that the proposed estimator is consistent with the Kalman estimator when all the PMU measuring devices operate well. When the PMU device is attacked and the measurement is abnormal a sufficient condition is provided under which the security state estimator is stable.

## Keywords

digital twin thermal power unit digital transformation digital twin service carbon peaking and carbon neutralization

## Recommended Citation

Ze Dong, Wei Jiang, Xiaoyan Wang, Lei Liu. Application of Digital Twin in Digital Transformation of Thermal Power Units[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1144-1156.

# 数字孪生在火电机组数字化转型中的应用

董泽<sup>1,2</sup>, 姜炜<sup>1,2</sup>, 王晓燕<sup>1\*</sup>, 刘磊<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 河北省发电过程仿真与优化控制技术创新中心, 河北 保定 071000;

2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206; 3. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100043)

**摘要:** 随着“碳达峰、碳中和”国家战略的提出和“降本、提质、增效”成为行业共识, 火电机组数字化转型迫在眉睫。探索了数字孪生在火电机组数字化转型中的应用, 提出了火电机组数字孪生系统的四维模型和 5 种内部关系, 重点介绍了系统调度平台及智能发育、智能感知、智能评估、智能优化、智能安防 5 类服务的功能、架构、目标, 展望了系统的 3 个发展阶段。预期提高火电机组的测量、控制、调度、管理水平, 巩固火电保供和调峰战略地位, 实现智能控制、智慧管理、节能降耗、低碳环保的数字化转型目标。

**关键词:** 数字孪生; 火电机组; 数字化转型; 数字孪生服务; 碳达峰、碳中和

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)06-1144-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0229

**引用格式:** 董泽, 姜炜, 王晓燕, 等. 数字孪生在火电机组数字化转型中的应用[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1144-1156.

**Reference format:** Dong Ze, Jiang Wei, Wang Xiaoyan, et al. Application of Digital Twin in Digital Transformation of Thermal Power Units[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1144-1156.

## Application of Digital Twin in Digital Transformation of Thermal Power Units

Dong Ze<sup>1,2</sup>, Jiang Wei<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoyan<sup>1\*</sup>, Liu Lei<sup>3</sup>

(1. Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University,

Baoding 071000, China; 2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd, Beijing 100043, China)

**Abstract:** The national strategy of "carbon peaking and carbon neutralization" and the industry consensus of "reducing cost, improving quality and increasing efficiency" require the digital transformation of thermal power units. *The application of digital twin in the digital transformation of thermal power units is researched, the four-dimensional model and five internal relationships of thermal power unit digital twin system are proposed, the functions, architecture and objectives of system scheduling platform and five kinds of services, intelligent development, intelligent perception, intelligent evaluation, intelligent optimization and intelligent security are introduced, and the three development stages of the system are prospected.* It is expected to improve the measurement, control, scheduling and management of thermal power units, consolidate the strategic position of thermal power supply and peak shaving, and realize the digital transformation goals of intelligent control, intelligent management, energy saving, low carbon and environmental protection.

**Keywords:** digital twin; thermal power unit; digital transformation; digital twin service; carbon peaking and carbon neutralization

收稿日期: 2022-03-17 修回日期: 2022-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(71471060); 河北省自然科学基金(E2018502111)

第一作者: 董泽(1970-), 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为大型火电机组建模仿真、智能控制、智能化系统研发等。E-mail: dongze33@126.com

通讯作者: 王晓燕(1982-), 女, 讲师, 博士, 研究方向为电力生产过程建模、仿真与优化控制。E-mail: wxyncepu@126.com

## 0 引言

数字化转型指以数据作为关键要素, 以信息技术与各个行业全面融合为主线, 以提升质量和效益为目标, 变革生产方式、商业模式和产业组织方式的系统转型过程<sup>[1]</sup>。我国在《2035年远景目标纲要》中提出“推动数据赋能全产业链协同转型, 在重点行业和区域建设若干国际水准的工业互联网平台和数字化转型促进中心”的目标<sup>[2]</sup>。

火力发电是能源电力供应的重要组成部分。当前, 大多数火电机组处在自动化和信息化发展阶段, 测量、控制、调度、管理水平弱, 关键参数调节能力差, 燃烧、风烟、汽水等子系统运行适应性不足<sup>[3]</sup>。火电发展现状与智能控制、智慧管理、节能降耗、低碳环保的发展目标形成鲜明对比: ①国家提出了“碳达峰、碳中和”的战略<sup>[4]</sup>, 为节能减排制定了时间表, 火电作为排碳大户肩负巨大的减排责任; ②新能源的大规模布局要求火电机组大量参与深度调峰<sup>[5]</sup>, 以消除风能、太阳能等一次能源不可存储、受环境影响波动大的缺点; ③“降本、提质、增效”成为行业发展共识, 优胜劣汰、上大压小成为火电发展趋势。基于上述火力发电的时代使命和发展要求, 火电机组数字化转型迫在眉睫。

数字孪生理念由Grieves于2003年在密歇根大学的产品生命周期管理高管课程提出<sup>[6]</sup>。2010年, 美国国家航空航天局(NASA)在建模、仿真、信息技术和处理路线图Area 11中提出了数字孪生概念并给出定义<sup>[7]</sup>。在Grieves和NASA等机构的研究推动下, 数字孪生得到了制造业<sup>[8]</sup>、航空航天<sup>[9]</sup>、军事<sup>[10]</sup>等不同领域专家学者的广泛关注, 其系统架构<sup>[11]</sup>、孪生模型<sup>[12]</sup>、服务功能<sup>[13]</sup>被不断完善, 西门子Simcenter 3D平台<sup>[14]</sup>、通用电气Predix平台<sup>[15]</sup>、法国达索3D EXPERIENCE平台<sup>[16]</sup>等数字孪生产品不断涌现, 数字孪生正逐步由理论走向落地。

目前, 工业领域数字孪生研究主要集中于离散型生产过程, 流程型生产过程特别是火力发电过程的数字孪生研究较少。鉴于此, 本文将数字孪生的概念和内涵引入火电机组数字化转型中, 在Grieves三维模型<sup>[6]</sup>的基础上提出了火电机组数字孪生系统的四维模型和5种内部关系, 对其整体架构、系统服务进行了设计, 对其发展趋势进行了展望, 以为火电机组数字化转型提供高效、安全、经济的解决方案, 促进火电机组生产质量和社会责任附加值的最大化。

## 1 火电机组数字孪生系统功能架构

本文提出了如图1所示的火电机组数字孪生系统四维模型和5种关系: 四维模型包括物理原生体、数字孪生体、数字孪生服务、数字孪生信息; 5种关系为数字孪生体到物理原生体的“映射”关系、数字孪生体到数字孪生服务的“支撑”关系、数字孪生服务到物理原生体的“指导”关系、数字孪生服务到数字孪生体的“调度”关系、物理原生体到数字孪生服务和数字孪生体的“驱动”关系。

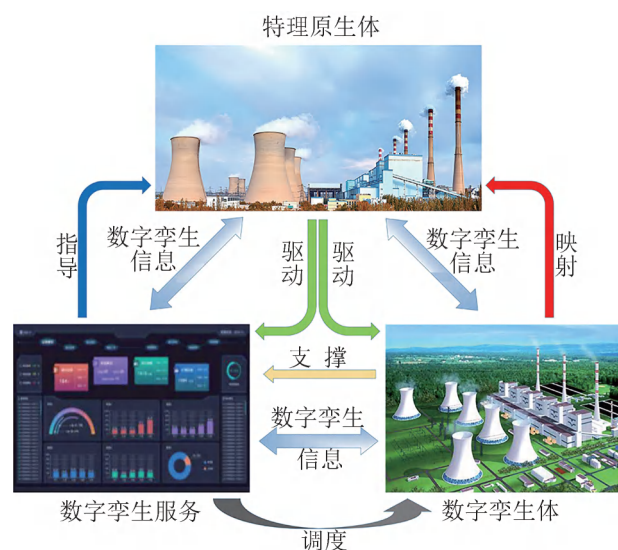


图1 火电机组数字孪生系统的四维模型和5种关系  
Fig. 1 Four dimensional model and 5 relationships of digital twin system of thermal power unit



## 2 物理原生体

物理原生体是现场客观存在的所有对象的集合，是完成生产目标、执行生产任务、调控生产品质的直接载体。所有已经存在的软件、硬件、资源共同构成了物理原生体。物理原生体包含生产和管理 2 个维度的内容：

(1) 生产维度。生产维度是现场最基础、最核心的环节，直接影响产品输出、产品质量、生产效益等指标，反映了火电机组的个体利益。生产维度包括运行操作、控制系统、生产设备、工艺流程、任务指标、工质流转、检查修理等要素，在虚拟空间中映射为工艺流程级的数字孪生体模型。

(2) 管理维度。管理维度通过组织、调度、监管等行为直接作用于生产维度各要素，达到间接影

响产品输出、产品质量、生产效益等指标的目的。各要素通过对火电机组个体利益的调配实现服务电厂利益、集团利益、电网利益的目的，具有宏观性和全局性。管理维度包括工厂结构、人员组织、物料管理、状态监视、电网调度、集团管理、制度规范等要素，在虚拟空间中映射为生产效能级数字孪生模型和企业运营级数字孪生模型。

## 3 数字孪生体

数字孪生体是物理原生体在虚拟空间的数字“映射”，忠实反映了物理原生体全生命周期的全要素状态，伴随着物理原生体的发展、成熟、衰老而实时动态演化，具有多元化、多层次、多尺度、全周期、全范围、全状态的特点，其功能架构如图 2 所示。

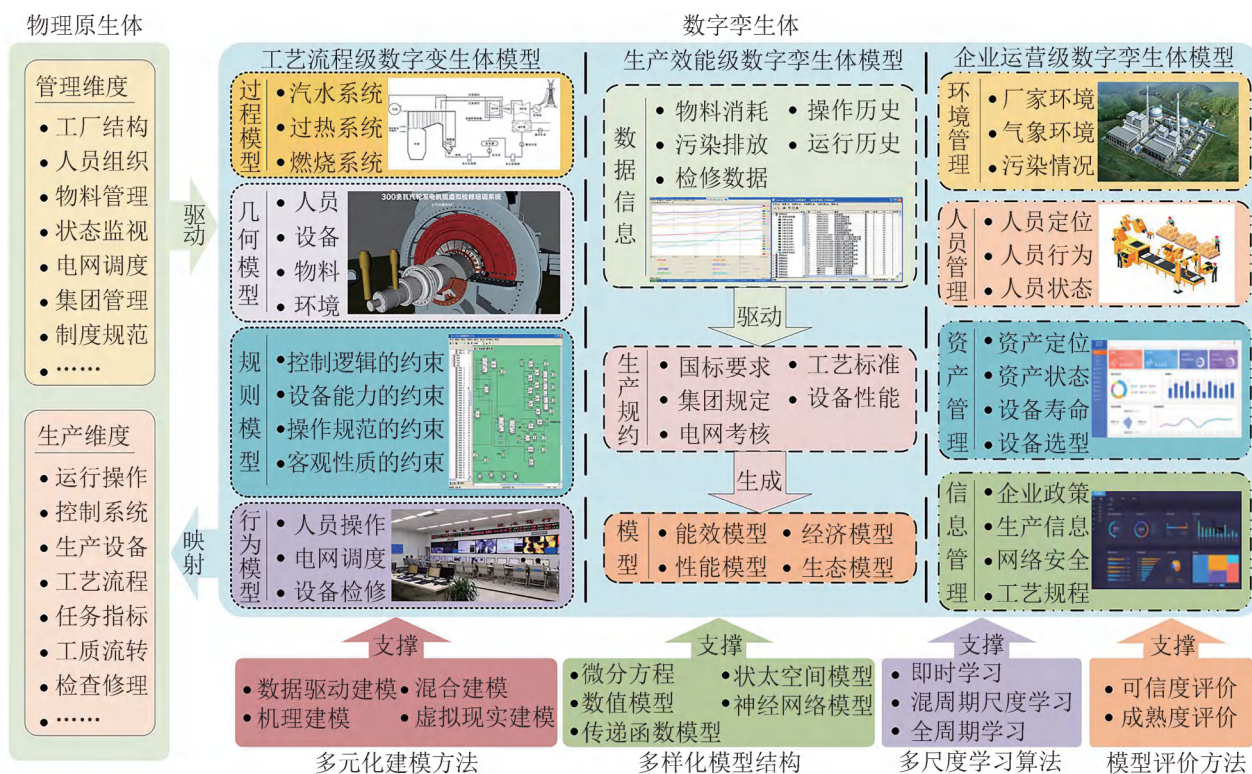


图 2 数字孪生体功能架构  
Fig. 2 Function architecture of digital twin model

### 3.1 数字孪生体构成

(1) 工艺流程级模型

由过程、几何、规则、行为 4 部分模型组成：

过程模型指物理原生体中通过物理变化和化学变化进行的生产过程所对应的模型，如汽水系统、过热系统、燃烧系统等过程的模型；几何模型由

人员、设备、物料、环境4部分构成, 主要以3D结构模型的形式建立, 辅助以3R技术完成监督、展示、人机交互等功能; 规则模型指客观存在的、不可抗力的事物规律(设备能力的约束、客观性质的约束)和人为施加的、体现运行人员意志的规则约束(控制逻辑的约束、操作规范的约束); 行为模型指外界施加到系统中的各种行为, 如运行人员的操作、电网的调度指令、设备的检修过程等。

### (2) 生产效能级模型

生产效能级模型是对现场生产品质以及经济性、环保性指标的凝练与综合, 由能效、经济、性能、生态4类模型组成。通过物料消耗、污染排放、检修数据、操作历史、运行历史等数据信息, 结合国标要求、工艺标准、集团规定、设备性能、电网考核等规则约束, 采用基于历史数据驱动的建模方法可以建立生产效能级模型。结合工艺流程级模型中的过程模型, 可以实现对系统效能的定性分析与定量计算, 进而揭示生产要素与生产效能间的作用关系, 达到指导生产、改良工艺、优化运行的目的。

### (3) 企业运营级模型

企业运营级模型主要依托三维可视化和人机交互技术, 完成企业管理在数字空间的镜像模拟和全维度掌控, 最终实现对生产要素的服务和指导, 由环境管理、人员管理、资产管理、信息管理4部分组成。

## 3.2 数字孪生体支撑要素

数字孪生体模型的建立、运行离不开以下4项要素的支撑:

(1) 多元化建模方法。包括数据驱动建模、机理建模、虚拟现实建模。

(2) 多样化模型结构。对于同一系统, 要根据定性分析、定量计算、状态监测等多样化的服务需求选取多样化的模型结构, 建立最合适的孪生模型。

(3) 多尺度学习算法。根据系统特性选取合适

的时间尺度, 如即时学习或全周期学习等, 满足不同的模型用途。

(4) 模型评价方法。通过可信度与成熟度指标进行模型的静态评估和动态评价, 确保模型始终保持较高的可用度。

## 4 数字孪生服务

数字孪生服务指基于数字孪生体模型所开展的以服务物理原生体优化运行为目的的一系列应用, 包含智能发育、智能感知、智能评估、智能优化、智能安防5项内容。

### 4.1 数字孪生系统调度平台

数字孪生系统调度平台是数字孪生服务的大脑和中枢, 采用激励式、微服务、虚拟化的调度机制, 其功能架构如图3所示。

#### (1) 激励式

本平台基于华北电力大学韩璞教授提出的激励式仿真思想<sup>[17]</sup>进行设计, 即数字孪生服务接受数字孪生体模型的数据驱动后, 完成数字孪生服务的逻辑运算, 并将运算结果传递作用于数字孪生体模型。平台内置有模型加载、模型运行、故障模拟、场景载入、场景冻结、场景回退、运行监视、信息记录等功能, 可为各项数字孪生服务的开展提供模型条件。

#### (2) 微服务

数字孪生服务可分解为一些通用或专用的微服务, 如辨识、优化、评价、预测、数据处理、数据融合、故障诊断等。按照模块化、通用化、灵活化的原则, 采用统一的接口、通讯协议、文件规约开发各项微服务, 最终通过逻辑组态或编程组态微服务的形式实现更加复杂、高级的数字孪生服务。

#### (3) 虚拟化

采用虚拟化技术, 根据需求实例化多项数字孪生服务, 各服务间并行运算、互不干扰, 确保系统同一时刻可对外提供多项并发服务。



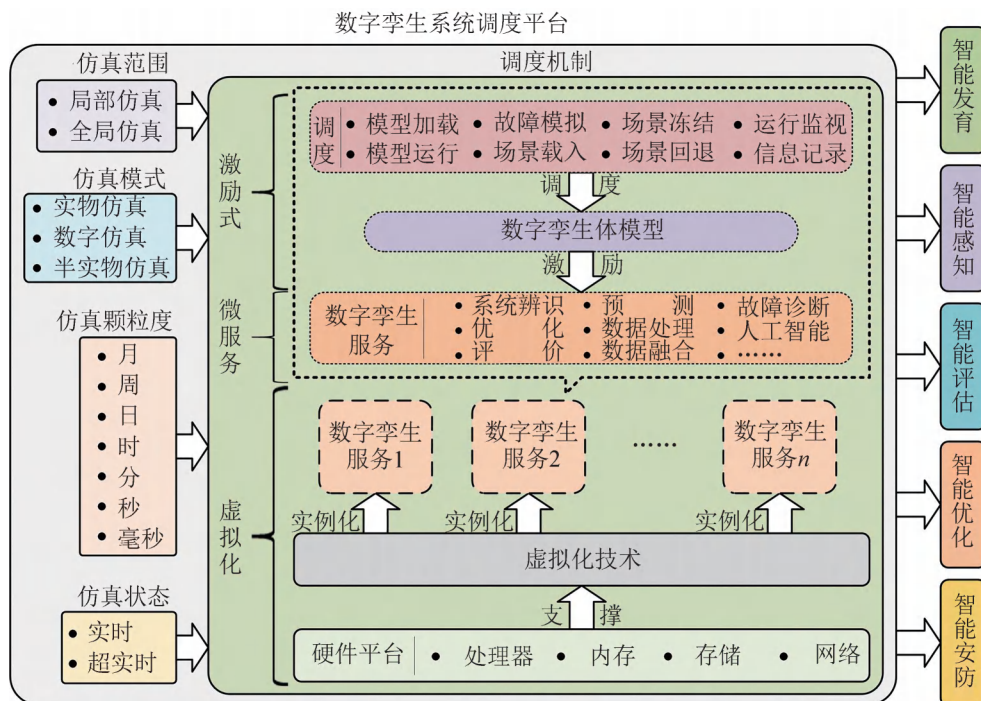


图3 数字孪生系统调度平台功能架构  
Fig. 3 Function architecture of digital twin system scheduling platform

同时，平台支持实物仿真、数字仿真、半实物仿真，可通过组态的形式进行局部或全局孪生模型的仿真研究，可根据服务的精度、实时性需求选择或动态调整仿真颗粒度。平台还支持以超实时仿真的方式进行物理原生体的态势感知等。

### 4.2 智能发育

本系统将模型可信度评估方法“校核、验证与确认(VV&A)<sup>[18]</sup>”和文献[19]的成熟度评级机制相结合，提出了如图4所示的数字孪生体智能发育服务功能架构，将模型发育等级分为不成熟、可信任、可应用、可协作、最优5个级别，实现了模型静态评估和动态评价机制的融合。

#### (1) 不成熟级别

该级别代表模型尚在开发设计中或模型开发设计失败或模型已经失效，对于失败或失效的模型要及时舍弃。

#### (2) 可信任级别

模型通过 VV&A 评估后转为可信任级别，对

该级别模型进行成熟度评价。

#### (3) 可应用级别

可信任级别模型成熟度评价合格后，转为可应用级别。该级别模型仍存在较大误差，仅允许通过独立仿真的形式参与数字孪生服务。

#### (4) 可协作级别

可应用级别模型实时观测物理原生体的运行状态，通过状态反馈、状态补偿等不断校正，成熟度进一步提高，转化为可协作级别，可与其他系统的可协作级别或最优级别模型开展协同仿真。

#### (5) 最优级别

可协作级别模型经过一段时间的观测校正和成熟度评估后，进一步转化为最优级别。该级别模型具备最高的优先级。该级别模型仍需进行实时的观测校正和成熟度评估。

模型成熟度评估中融合了复杂度、激励程度(模型在不同工况下的状态是否被完全激励)、误差统计、稳定运行时长、定性评价等指标，以滑

动时间窗口为评价区间, 采取“逐级上升、越级下降、一票否决”的变化机制动态调整模型发育等级: 当成熟度上升时, 模型发育等级必须逐级提升; 当成熟度下降时, 根据评价结果为模型选择匹配的发育等级, 必要时可直接宣布模

型失效。

由于模型发育是一个缓慢进行的过程, 因此, 要求同一时刻同一系统有多个模型在同时演化, 确保模型库中随时有可协作或最优级别的模型供用户使用。

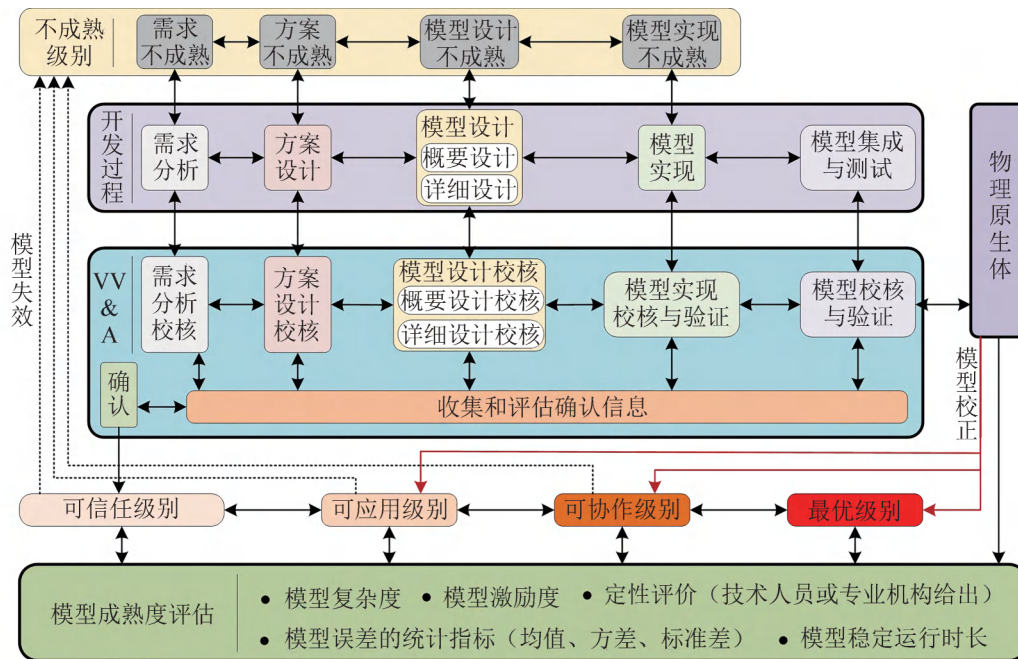


图4 数字孪生体智能发育服务功能架构

Fig. 4 Function architecture of digital twin model intelligent development service

### 4.3 智能感知

智能感知服务通过信息感知、信息融合、状态感知、态势感知4个步骤, 实现对物理原生体海量运行信息的挖掘分析与综合利用, 对于揭示物理原生体深层次运行机理、探索物理原生体内部运行状态、研判物理原生体发展变化趋势具有重要意义, 其功能架构如图5所示。

#### (1) 信息感知

信息感知是输入源头, 具有多源异构的特点, 其内容包括物理原生体运行过程的音视频信息、实时数据、历史数据等。随着先进测量(多相流、声学CT等)、无线射频、智能仪表、传感器、无人巡检技术的成熟落地, 信息感知的来源和范围被进一步扩大, 为物理原生体深层次的分析、感

知、诊断、预判提供了信息基础。

#### (2) 信息融合

海量的不同形态格式的信息相互融合, 是信息分析利用的基础。按照信息处理的抽象程度, 信息融合可以分为数据级、特征级、决策级信息融合。从信息融合流程来分析, 信息融合由数据校准、数据关联、参数估计、属性分类、行为估计等步骤构成。其中, 目标识别得到的是一个当前的实时状态, 对应智能感知服务中的“状态感知”步骤, 行为估计得到的是系统未来一段时间的演化态势, 是对未来发展变化的一种估计, 对应智能感知服务中的“态势感知”。

#### (3) 状态感知

物理原生体有许多状态直接关系到机组的安



全运行和高品质生产，如炉膛燃烧情况、锅炉四管温度分布、汽轮机叶片气蚀等。受限于测量技术或成本，目前仅能通过摄像头监控或检修拆解等方式进行观察。依托已有传感器数据，通过信息融合技术，可以实现对上述设备的状态感知，化不可测为“可测”，化不可视为“可视”，实现对系统深层次状态的感知与挖掘，实现物理原生体运行状态的实时展示、故障的实时报警等，减轻运行人员监盘压力，进而实现少人值守或无人值守。

(4) 态势感知

智能感知还具备对系统未来发展变化趋势的感知预判能力，即具备“态势感知”功能。包括智能预警与智能维护两部分：智能预警不仅可以

实现设备故障预警、故障影响评估，还可以结合系统知识库给出风险规避的指导性建议；智能维护可以实现对设备性能、寿命的态势感知，给出设备的检修预报和检修指导方案。态势感知的引入可以提高系统“未卜先知”的能力，提高运行的安全性和经济性。

4.4 智能评估

智能评估服务是评判物理原生体运行状态的“镜子”，是智能优化服务和智能安防服务的“检验标尺”，由质量评估和性能评估两部分构成。质量评估针对物理原生体基本生产目标完成情况。性能评估针对物理原生体生产质量和社会责任履行情况。其功能架构如图 6 所示。

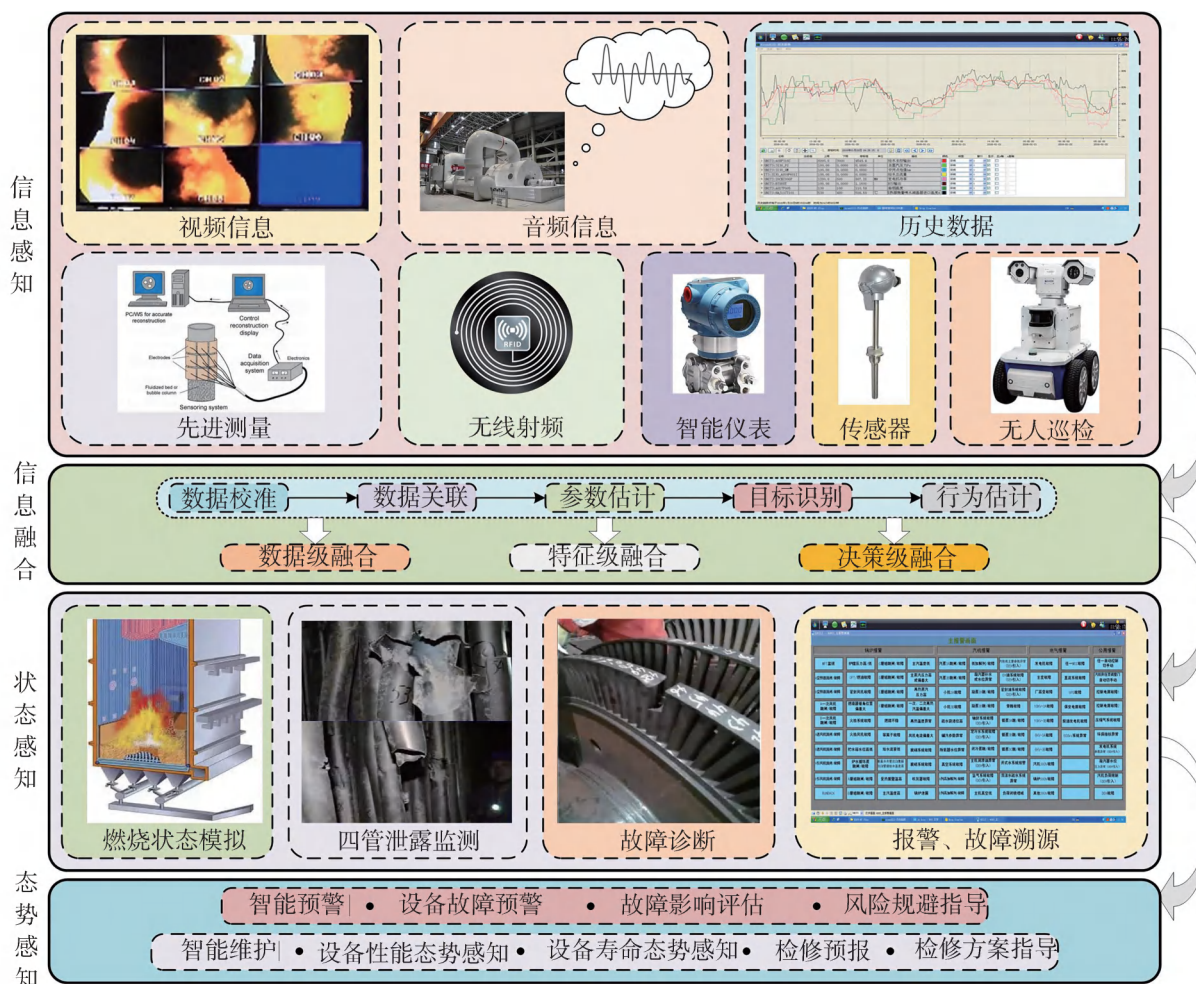


图 5 数字孪生系统智能感知服务功能架构  
Fig. 5 Function architecture of digital twin system intelligent perception service

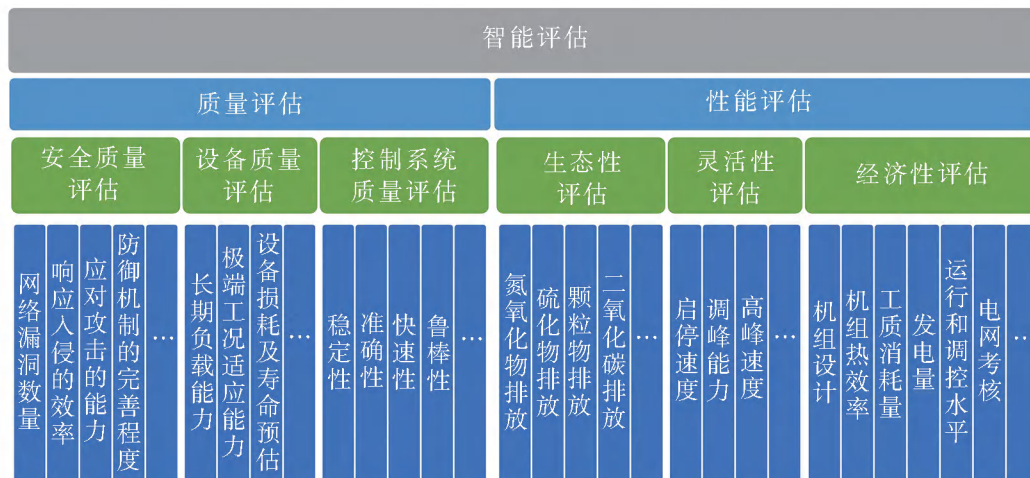


图6 数字孪生系统智能评估服务功能架构

Fig. 6 Function architecture of digital twin system intelligent evaluation service

### (1) 质量评估

1) 安全质量评估, 考察系统网络漏洞数量、响应入侵效率、应对攻击能力等, 帮助运行人员及时发现网络漏洞, 提早开展优化升级;

2) 设备质量评估, 考察物理原生体各设备的负载能力、极端工况适应能力、损耗情况、剩余寿命等, 为设备维护、机组检修、硬件升级提供指导;

3) 控制系统质量评估, 考察控制算法、控制逻辑的稳定性、快速性、准确性、鲁棒性等, 辅助热工人员对控制系统进行优化升级。

### (2) 性能评估

1) 生态性评估, 通过分析机组运行参数与氮氧化物排放、硫化物排放、颗粒物排放等指标的关系, 给出机组生态环保性能的评估结果和提升建议, 特别是通过二氧化碳排放评估, 给出机组减碳、减排、提效的建议;

2) 灵活性评估, 通过考察机组启停、调峰期间各系统运行状态和调节速度, 给出机组灵活性提升建议;

3) 经济性评估, 综合机组设计、机组热效率、工质消耗、发电量、运行和调控水平、电网考核情况等, 给出机组的经济性评估结果, 并提出改进建议。

## 4.5 智能优化

智能优化服务是数字孪生服务的核心功能。其以数字孪生体为仿真对象, 通过测试、评估、校正3个环节实现控制系统的闭环智能优化, 其功能架构如图7所示。

### (1) 控制系统测试

采用激励式仿真思想, 在数字孪生系统调度平台的指挥下, 以数字孪生体或常规模型作为仿真对象, 加载或模拟不同的测试场景(不同工况、运行人员干预、机组启停、故障、报警、极端工况、调峰等), 激励控制系统开展逻辑运算, 完成控制效果的测试与结果量化, 为后续评估提供数据基础。

### (2) 控制系统评估

采用智能评估服务对控制系统测试结果进行评估, 为后续系统校正提供评估依据。

### (3) 控制系统校正

按照校正的范围, 分为参数级、系统级、机组级校正。

1) 参数级校正。在实际生产运行中, 锅炉煤质、阀门特性等工质或设备状态处于实时变化中, 导致控制系统或算法模型参数一段时间后适配性降低。需要经常性地开展参数级优化, 通过经验



公式整定、专家经验整定、群体智能优化等方式，确保各控制系统参数处于最优状态。

2) 系统级校正。对于一些复杂控制系统，如大惯性系统、耦合系统等，通过采用智能控制算法、控制策略优化设计、开放式算法接口等方式对控制系统、控制回路进行整体设计优化，新的控制系统经过测试后将取代原有系统开展工作。

3) 机组级校正。将视域聚焦到整个机组的顶层设计和优化上，通过多目标决策、专家决策、最优控制等手段，实现机组运行的全局最优。

上述提到的控制系统测试、评估、校正流程，

为“专家经验主导的半自动优化”，需要人工干预和专家经验。在半自动优化过程中，优化方法、控制经验、控制算法、控制模式逐渐积累，形成“‘智能优化’知识及模式储备库”。随着储备库的逐渐壮大，最终在参数级完成由经验整定到参数自适应的转变，在系统级完成由专家经验到控制系统深度自诊断学习的转变，在机组级完成由人工多目标决策到多目标自优化、自决策的转变，最终形成“智能自测试、自评估、自校正”的智能优化服务模式。

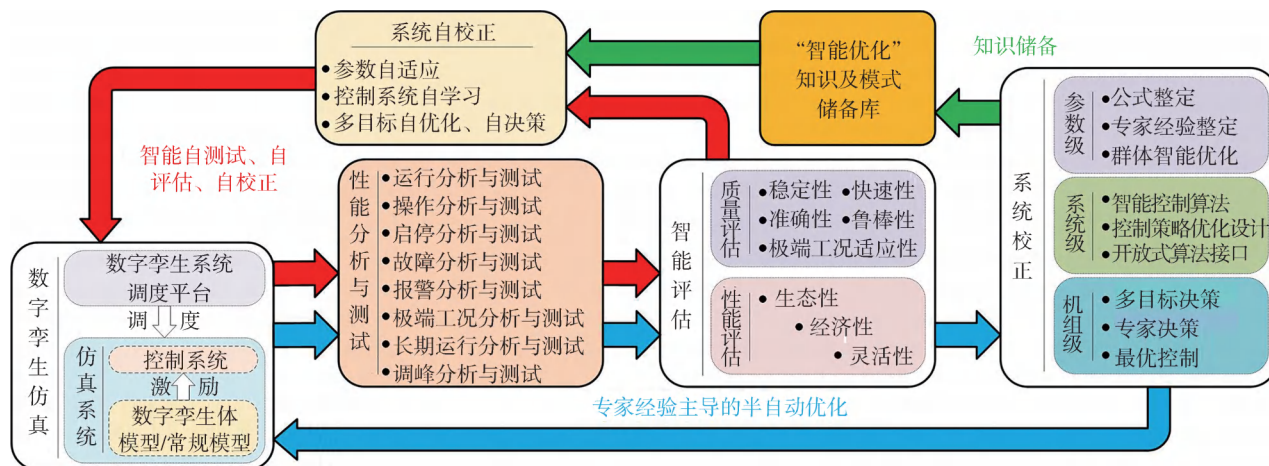


图 7 数字孪生系统智能优化服务功能架构

Fig. 7 Function architecture of digital twin system intelligent optimization service

### 4.6 智能安防

响应产业数字化转型的时代号召，火电机组与云计算、区块链等技术的结合势在必行。基于数字孪生体模型开展网络安全的排查和演习，寻找漏洞、总结攻防经验，可以在不破坏物理原生体正常运行的同时，实现对物理原生体安防机制的优化升级。数字孪生系统智能安防服务功能架构如图 8 所示，包含边界安全防御、被动安全防御、主动安全防御 3 种类型，可进一步划分为 3 个防御层次：

#### (1) 网络安全监测和督查

面向物理原生体的实时网络安全，主要包括资产探测、蜜罐诱捕、流量监测等技术：资产探测实现网络资产的信息收集，对于加深系统认知、开展威胁分析、评估系统状态、提出应急响应具有重要意义；蜜罐诱捕通过在网络中布置欺骗系统的方式，诱导敌人开展无益进攻，减弱攻击强度，推测攻击意图；流量监测为入侵监测、协议分析、网络行为分析、故障排查提供数据基础。



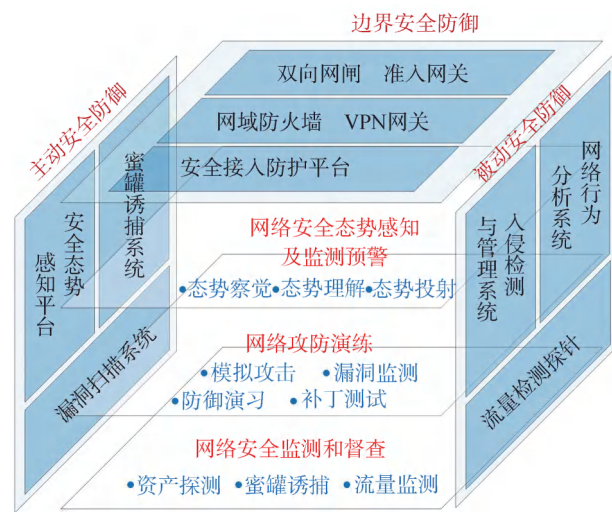


图8 数字孪生系统智能安防服务功能架构

Fig. 8 Function architecture of digital twin system intelligent security service

## (2) 网络攻防演练

网络攻防演练以数字孪生体为演练对象，可以规避对物理原生体正常运行的影响。针对已有的安防措施开展深层次、多维度、多路径、多手段、对抗性、可审计的攻防演练，通过大数据分析、流量分析、专家指导等方式对网络安防的薄弱环节、漏洞威胁进行分析排查，最终采用补丁、升级等方式提升系统安防能力。

## (3) 网络安全态势感知及监测预警

面向物理原生体的网络安全发展变化趋势评估，包括态势察觉、态势理解、态势投射3个部分：态势察觉即通过对信息的处理、建模，完成

对网络活动的辨识与特征提取；态势理解通过分析攻击行为间的逻辑关系对其攻击意图和后续行为进行推测；态势投射对系统在攻击威胁下可能产生的影响、损失进行风险评估，对需要保护的對象进行综合判定。

## 5 数字孪生信息

数字孪生信息(digital twin information, DTI)包括物理原生体、数字孪生体、数字孪生服务间的通讯链路及传输数据，为数字孪生虚实交融、以实写虚、以虚促实提供信息基础，具有多“元”信息和多“源”信息的特点，其内容构成如图9所示。

## (1) 多“元”信息

包括服务信息、生产信息、管理信息三方面的内容。服务信息是数字孪生服务的输出；生产信息是物理原生体生产过程的实时和历史信息；管理信息是物理原生体管理过程的信息，如资产管理、信息管理、人员管理等。多“元”信息为系统各部分协调运行提供桥梁和纽带。

## (2) 多“源”信息

数字孪生系统高实时性、大数据量、多点并发的特点对通讯的速率、带宽和形式提出了更高的要求。IPv6、SRv6、5G、TSN、SDN、LoRa、OPC、PROFIBUS等通讯协议或技术扬长避短、分工协作、相互协同，为数字孪生信息的多“源”传输赋能。



图9 数字孪生信息内容构成

Fig. 9 Content composition of digital twin information

## 6 火电机组数字孪生系统发展展望

本文从架构部署、职能定位、模型工程三方面切入展望了火电机组数字孪生系统的初始、发育、成熟3个发展阶段，如图10所示。

### 6.1 架构部署

初始阶段采用边缘计算主导的架构，仅将对算力要求较高、实时性要求较弱的功能部署在云端运行。

发育阶段采用云边协同计算的架构，该阶段随着通讯和网络安防技术的不断进步，通讯带宽和通讯速率不断提升，网络安全性更加有保障，云端逐步成为数字孪生系统运算的“主阵地”。

成熟阶段采用云计算主导的架构，场站端

仅保留实时性要求极高或数据量要求极大的功能，基于云计算的优势，数字孪生系统逐渐具备弹性扩容、故障自愈、服务自治、敏捷开发的特点。

### 6.2 职能定位

初始阶段数字孪生系统处于间接辅助地位，辅助分散控制系统(distributed control system, DCS)进行控制、决策、运行、管理，同时与DCS、物理原生体间相互交融、共同发育，为国产智能控制系统(intelligent control system, ICS)研发积累关键技术。

发育阶段数字孪生系统处于核心参与地位，该阶段DCS被ICS取代，数字孪生系统作为ICS最重要、最核心的构成要素，直接参与控制、决策、运行、管理中的部分任务。

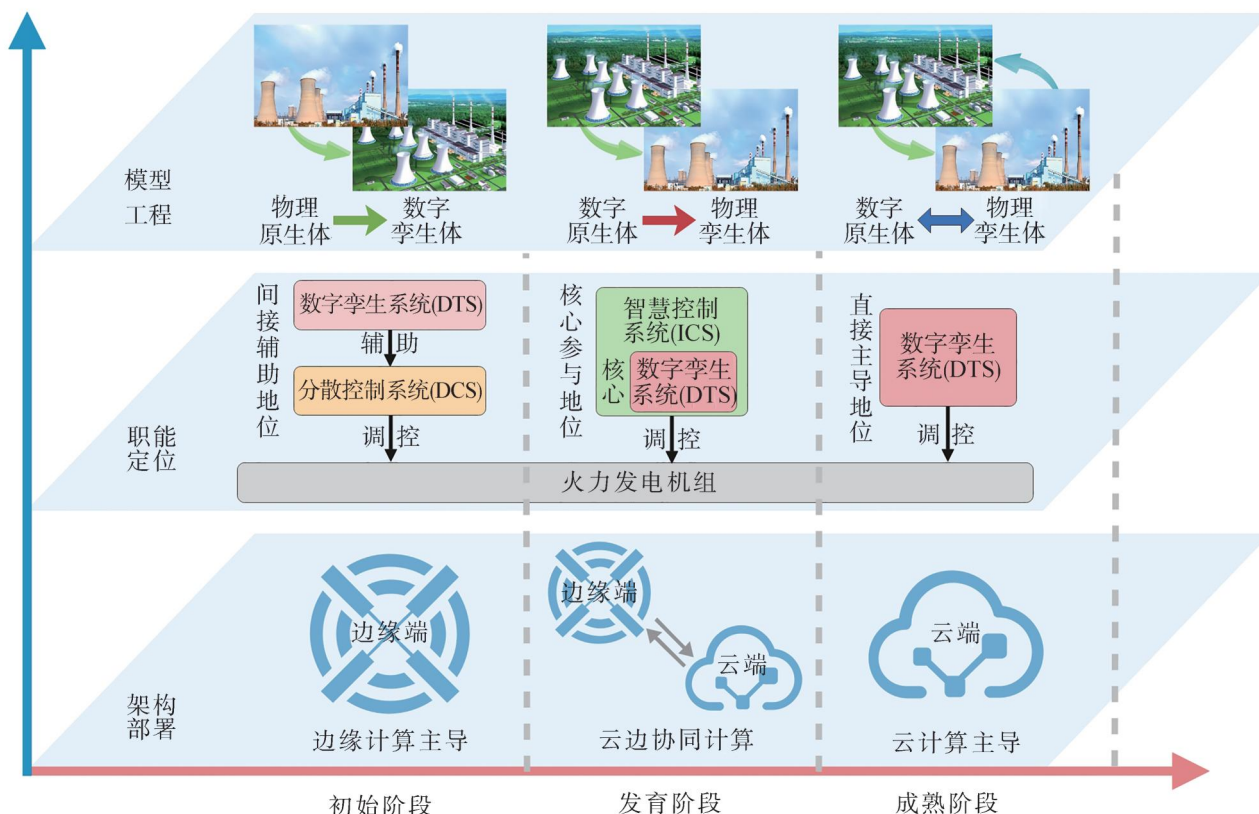


图10 火电机组数字孪生系统发展展望

Fig. 10 Development prospect of digital twin system thermal power units

成熟阶段数字孪生系统处于直接主导地位, 孪生模型与物理原生体间的相似性越来越高, 依照孪生模型图纸可精确设计物理原生体的集控方案。数字孪生系统完全替代 ICS, 完成火电机组全过程的控制、决策、运行、管理任务, 控制理论、控制系统、控制模式进入新的历史阶段, 生产过程真正实现全透明、全掌控、自趋优。

### 6.3 模型工程

初始阶段遵循由实体化到虚拟化的路线, 即针对已有的物理原生体(火电机组)采用建模技术得到其数字孪生体。

发育阶段遵循由虚拟化到实体化的路线, 即综合上一阶段得到的运行经验、优化策略、决策方案、安防体系、平台架构等软硬件技术, 融合用户期望和使用要求, 设计出火电机组全流程、全范围、全工况的“数字原生体”模型。再以“数字原生体”模型作为施工图纸, 建设忠实反映“数字原生体”设计内容、设计指标、设计期望的“物理孪生体”(火电机组)。

成熟阶段遵循“数字原生体”和“物理孪生体”协同发展的思路, 在虚实协同中反复迭代设计方案、连续优化设计图纸、不断提升设计期望, 持续改进原生体和孪生体质量。

## 7 结论

当前, 数字化转型已经成为各行业发展的核心战略。随着云计算、大数据、物联网、虚拟现实等技术的发展成熟, 数字孪生逐渐由概念走向成熟。

鉴于此, 本文将数字孪生引入到火电机组数字化转型中, 提出了火电机组数字孪生系统的四维模型和5种内部关系, 阐述了物理原生体、数字孪生体和数字孪生信息的构成, 重点介绍了数字孪生系统调度平台及智能发育、智能感知、智能评估、智能优化、智能安防5类数字孪生服务的功能、架构、目标, 为火电行业落实“碳达峰、

碳中和”国家战略, 巩固保供和调峰战略地位, 促进行业“降本、提质、增效”提供了高效、安全、经济的解决方案, 赋能火电机组智能控制、智慧管理、节能降耗、低碳环保的数字化转型目标实现。

本文还从架构部署、职能定位、模型工程三方面对火电机组数字孪生系统的3个发展阶段进行了展望。

目前, 作者团队正与国家能源集团新能源研究院开展“智能控制研发平台”建设, 火电机组数字孪生系统是该平台的重要部分, 这也是我们在火电机组数字化转型路上的大胆尝试。但是, 当前数字孪生技术仍处于初始发展阶段, 模型精度、系统实时性与理想效果差距较大, 数字孪生服务的种类、广度和深度仍需不断加强。相信在数字化、智能化技术的不断发展驱动下, 在数字孪生系统“虚实交融、以实写虚、以虚促实”的不断迭代中, 数字孪生技术将更加成熟健壮, 火电机组数字化转型的程度将不断提升。

### 参考文献:

- [1] 陆洋, 王超贤. 数字化转型量化评估研究的比较分析与最新进展[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(9): 152-160.  
Lu Yang, Wang Chaoxian. Comparative Analysis and Research Progress on Quantitative Evaluation of Digital Transformation[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(9): 152-160.
- [2] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-11-19]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).  
Xinhua News Agency. The 14Th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and Outline of the Vision for 2035[EB/OL]. (2021-03-13) [2021-11-19]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm).
- [3] 崔青汝, 朱子凡. 智能发电运行控制技术[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 28-33.  
Cui Qingru, Zhu Zifan. Operation Control Technology for Intelligent Power Generation[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 28-33.
- [4] 新华社. 政府工作报告[EB/OL]. (2021-03-12) [2021-11-25].



- [http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content\\_5592671.htm](http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content_5592671.htm).
- Xinhua News Agency. Report On the Work of the Government[EB/OL]. (2021-03-12) [2021-11-25]. [http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content\\_5592671.htm](http://www.gov.cn/premier/2021-03/12/content_5592671.htm).
- [5] 孙伟卿, 宋赫, 韩冬, 等. 火电深度调峰改造近似动态规划方法[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1415-1426.  
Sun Weiqing, Song He, Han Dong, et al. Deep Peak-shaving Transformation Planning of Thermal Power Units Based on Approximate Dynamic Programming[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1415-1426.
- [6] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication[EB/OL]. [2022-01-05]. <https://www.researchgate.net/publication/275211047>.
- [7] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap[EB/OL]. [2021-12-15]. <https://www.researchgate.net/publication/280310295>.
- [8] 刘红彬, 申志强, 王轶泽, 等. 数字孪生模型在轴承套圈磨削加工中的应用[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 557-567.  
Liu Hongbin, Shen Zhiqiang, Wang Yize, et al. Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 557-567.
- [9] 刘瑜, 谢强. 数字孪生的技术特点及在飞行试验中的应用展望[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1364-1373.  
Liu Yu, Xie Qiang. Technical Characteristics of Digital Twins and Application Prospects in the Field of Flight Testing[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1364-1373.
- [10] 吴琳, 胡晓峰, 陶九阳, 等. 面向智能成长的兵棋推演生态系统[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(9): 2048-2058.  
Wu Lin, Hu Xiaofeng, Tao Jiuyang, et al. Wargaming Eco-system for Intelligence Growing[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(9): 2048-2058.
- [11] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.  
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [12] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.  
Zhang Lin, Lu Han. Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.
- [13] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.  
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [14] Siemens. Simcenter 3D Software[EB/OL]. [2022-02-01]. <https://plm.sw.siemens.com/zh-CN/simcenter/mechanical-simulation/3d-simulation/>.
- [15] General Electric. Predix, Your Industrial Internet Platform [EB/OL]. [2022-02-15]. <https://www.ge.com/cn/b2b/digital/predix>.
- [16] Dassault. What is 3De Experience Platform[EB/OL]. [2022-02-19]. <https://3dex.cn/highlights>.
- [17] 韩璞, 翟永杰, 王立志, 等. 基于虚拟DCS的激励式仿真系统分析与设计[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(2): 37-40.  
Han Pu, Zhai Yongjie, Wang Lizhi, et al. Analysis and Design of Stimulative Simulation System Based on Virtual DCS[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(2): 37-40.
- [18] 丁来军, 丁朝臣, 赵新芳, 等. 复杂产品的VV&A体系架构关键技术[J]. 计算机辅助工程, 2019, 28(1): 53-61.  
Ding Laijun, Ding Chaochen, Zhao Xinfang, et al. Key Technologies of VV&A Architecture for Complex Product[J]. Computer Aided Engineering, 2019, 28(1): 53-61.
- [19] Zhang Lin, Liu Ying, Laili Yuanjun, et al. Model Maturity Towards Modeling and Simulation: Concepts, Index System Framework and Evaluation Method[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, 2020, 11(3): 2040001.