

团体标准

T/CES XXX-XXXX

风电机组数字孪生系统
第1部分：总体要求
(征求意见稿)

Digital twins system for wind turbines-Part 1: General requirements

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 风电机组数字孪生系统特征、架构及组成.....	3
4.1 风电机组数字孪生系统特征.....	3
4.2 风电机组数字孪生系统架构.....	3
4.3 风电机组数字孪生系统组成.....	4
5 风电机组数字孪生系统技术要求.....	6
5.1 风电机组数字孪生模型要求.....	6
5.2 数据交互与存储技术要求.....	6
5.3 系统集成及仿真技术要求.....	7
5.4 可视化与人机交互技术要求.....	7
5.5 文档要求.....	8
6 风电机组数字孪生系统评价指标及量化方法.....	8
6.1 指标设立原则.....	8
6.2 指标权重确定原则.....	8
6.3 数据可采集性.....	8
6.4 数据完备性.....	8
6.5 数据准确性.....	9
6.6 数据交互一致性.....	9
6.7 数据交互实时性.....	9
6.8 信息直观性.....	9

前 言

规模化风电是我国构建以新能源为主体的新型电力系统的主力电源，其智能化水平直接影响未来电力系统的安全、高效、经济运行。风力发电场站地处偏远、工作条件复杂，安全运行要求高、难度大，亟需引入现代信息技术和新一代人工智能技术，提升风力发电数字化、智能化发展及应用水平。随着数字孪生技术的快速发展，风电机组数字孪生体成为重要发展目标，仿真模型是实现数字孪生体和物理实体实时交互的基础，贯穿于系统全生命周期各个阶段。结合我国当前风电发展现状和技术需求，设备精细化运维、数据治理、数据交互、实时通信、安全防护等方面面临较多亟待解决的问题。本标准侧重风电机组数字孪生系统的技术要求，明确了孪生模型、数据存储、数据交互、系统集成及仿真以及可视化与人机交互的技术要求。

本文件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准的结构与编写》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别中专利的责任。

本文件由华北电力大学提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会能源智慧化工作组负责归口。

本文件起草单位：华北电力大学、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、国家电投集团科学技术研究院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、北京华能新锐控制技术有限公司、国网信通产业集团有限公司。

本文件主要起草人：房方、胡阳、任鑫、郭琦、董得志、刘吉臻、王华、杨政厚、张杰、朱益华、岳红轩、石鑫、李炳森、杜静宇、陈修高、赵鹏程、张新丽、陈纲、张福国、孙晓彦、宋羽佳、孟鹏飞、那红宇、常建华、韩健。

本文件为首次发布。

风电机组数字孪生系统第 1 部分：总体要求

1 范围

本标准适用于风电机组数字孪生系统的设计、建设、科学研究、应用相关领域。

本标准规定了风电机组数字孪生系统的术语与定义、风电机组数字孪生系统特征架构及组成、风电机组数字孪生系统技术要求、风电机组数字孪生系统评价指标及量化方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.53-2001 电工术语 风力发电机组

GB/T 18451.1-2022 风力发电机组 设计要求

GB/T 35204-2017 风力发电机组 安全手册

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风力发电机组 wind turbine generator system

将风的动能转换为电能的系统。

3.2

数字孪生 digital twin

针对物理实体，充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据进行数据存储和数据交互，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的高精度实时仿真过程，在虚拟空间中构建一个与物理实体完全等价的数字等价体，借此来实现对物理实体的了解、分析和优化。

3.3

可视化与人机交互 visualization and human-computer interaction

通过图形化展示和用户交互的方式，提供直观、易理解和有效的用户与计算机系统之间

的沟通和互动，采用双向通信协议在各类用户终端，基于 3D 图形引擎，实时动态展示系统运行画面；通过引入数据可视化技术，对比展示系统的动态响应过程。

3.4

物理层 physical layer

物理层包含输变电设备设计、制造、交付、运维及报废回收等全生命周期所涉及的物理实体，其包括机器、人员、环境、材料等，是数字孪生的实现基础。

3.5

传输层 transmission layer

传输层的功能是为其他层级提供数据支撑服务，感知层采集到的物理实体数据通过传输层实时传递给虚拟层，虚拟层的管理控制指令也可通过传输层传递给物理层，用以实现物理层跟虚拟层之间的实时交互。

3.6

应用层 application layer

应用层是输变电设备数字孪生全生命周期中的具体业务应用，其包括输变电设备数字化研发、智能制造、物理与数字体双交付、智能运维等环节。

3.7

网络层 network layer

网络层负责将感知层获取的信息，安全可靠地传输到应用层，然后根据不同的应用需求进行信息处理。

3.8

平台侧通信网 platform side communication network

是一种用于连接云计算平台和终端用户设备的通信网络，是由一系列网络设备和技术组成的，包括云服务器、API 接口、网络协议等。

3.9

边缘网关 border gateway

部署在网络边缘侧的网关，通过网络联接、协议转换等功能联接物理和数字世界，提供轻量化的联接管理、实时数据分析及应用管理功能。

3.10

要素孪生模型 digital twin model of element

风电机组要素的数字孪生模型，包括叶片孪生模型、机舱孪生模型、塔筒孪生模型等。

3.11

数字线程技术 digital thread technology

指可扩展、可配置的组件化的企业级分析通讯框架，基于该框架可以展示资产数据在整个生命周期与价值链全部环节的跨层次、跨尺度、多视图模型的互联的数据流集成视图，是数字孪生技术体系中最为关键的核心技术。

3.12

业务系统 business system

根据应用需求完成对物理实体和孪生模型所产生数据的深度挖掘与特征提取，从而实现运行性能分析、状态监测、故障预警等功能的服务平台。

4 风电机组数字孪生系统特征、架构及组成

4.1 风电机组数字孪生系统特征

风电机组数字孪生体是融合状态全面同步感知、多领域融合精准映射、可全景化数字呈现、模拟仿真推演、模型迁移及优化自主更新、边缘治理等功能为一体的平台。可以用来监测风电机组的性能和健康状况，进行实时状态监测和故障预警，提高机组的可靠性和可用性，并降低运营和维护成本。可以用于优化风力发电机组的设计和运行策略，提高其发电效率和经济性。作为对数字孪生技术的应用探索，应重点关注智能算法拓展接口、边缘侧治理架构与模型自学习自更新等方面的研究。

4.2 风电机组数字孪生系统架构

风电机组数字孪生系统架构图见图 1，该系统以数字孪生平台为中心，主要包括物理层、系统层和应用层三个部分。

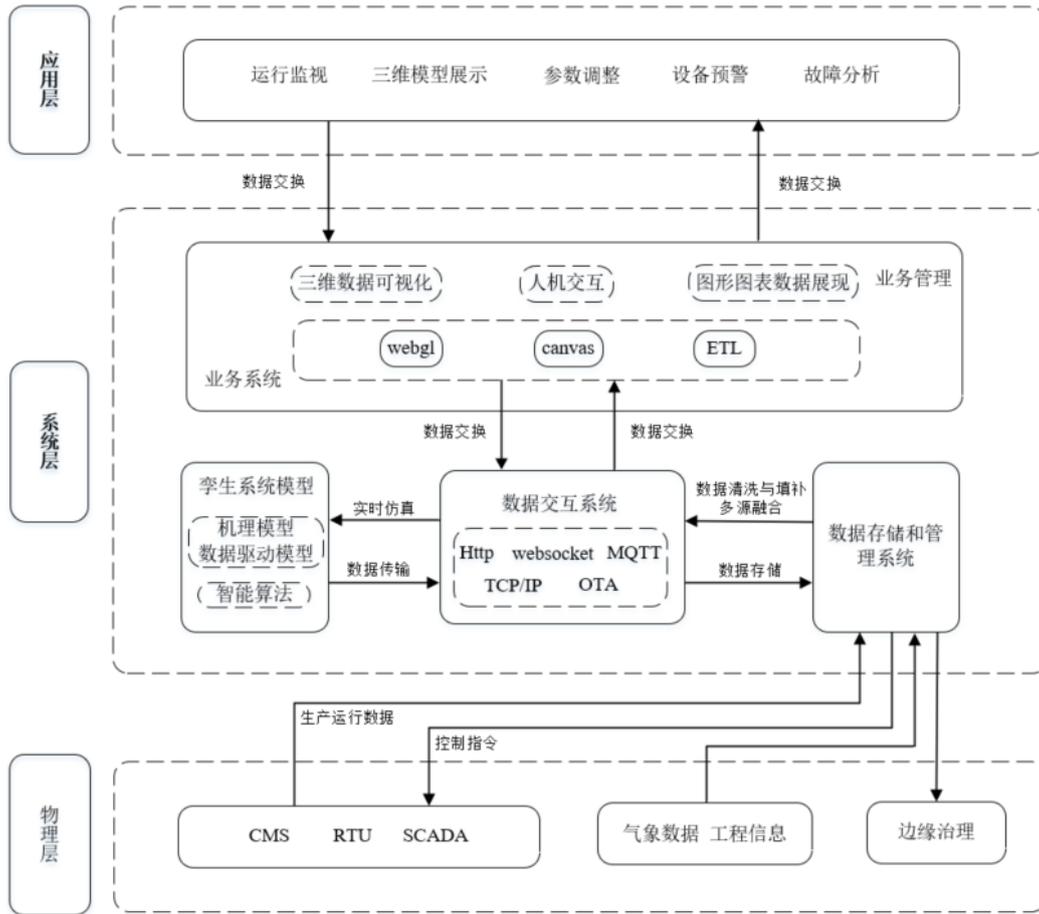


图 1 风电机组数字孪生体系架构

4.3 风电机组数字孪生系统组成

风电机组数字孪生系统的组成应包括：硬件设备/设施、软件系统/功能。选项包括：必需、建议、自选，具体应根据应用需求根据表 1 进行功能选配。

表 1 风电机组数字孪生系统组成选配

风电机组数字孪生系统选配项		选项		
		必需	建议	自选
硬件设备/设施	风力发电机组部件/单机/场群	√		
	机组运行辅助工具			√
	机组数据采集/传感器设备	√		
	边缘计算设备	√		
	云服务设备		√	
	电力传输设备	√		
	电力并网系统设备	√		
	气象环境监测设备	√		
	激光雷达/GPS 定位设备		√	

	数据传输/网络通讯设备	√		
	数据存储设备	√		
	能源供应设备	√		
	计算机/服务器设备	√		
	人机交互设备/终端	√		
软件系统/功能	风机运行状态监测功能	√		
	风电机组部件健康管理功能	√		
	风机运行故障诊断和预警功能	√		
	风机运行控制优化功能	√		
	机组综合资源管理功能	√		
	数据库/知识库	√		
	设备联网功能	√		
	信息接入功能	√		
	3D 可视化建模/管理功能	√		
	备份与存储功能		√	
	用户管理系统	√		
	系统综合管理中心/仪表盘	√		
	风机/场群管理系统		√	
	机组运行状态监测主系统	√		
	机组各部件状态监测子系统	√		
	数据采集/治理系统	√		
	模型构建/部署系统	√		
	模型验证、优化、更新系统	√		
	模型综合管理系统	√		
	故障诊断和预警告警系统	√		
	运行性能评价及优化系统	√		
	控制策略构建/管理系统	√		
	风机全生命周期管理系统		√	
	设备维护系统	√		
	容错管理系统		√	
	安全管理系统	√		
	应急指挥控制系统		√	
	人力资源管理系统		√	
	辅助设计和交付系统		√	
	培训和教学系统		√	
	能效管理系统			√

5 风电机组数字孪生系统技术要求

5.1 风电机组数字孪生模型要求

风电机组数字孪生模型应满足如下要求：

- 1) 应包括描述实际风电机组叶片、轮毂、机舱、塔筒、发电机及辅助设备等关键部件物理结构的结构参数；
- 2) 应包括描述实际风电机组机械特性、电磁特性、载荷特性等关键部件物理属性及其变化规律的动力学模型；
- 3) 应包括实际风电机组转矩控制、变桨控制、偏航控制等控制系统及相应的执行机构的控制模型；
- 4) 应具有整体性和灵活性，风电机组数字孪生模型应涉及部件级、机组级等不同尺度，服务于不同的业务需求；
- 5) 应具有准确性和有效性，能够实现对风电机组涉及机械、电子、电力的多领域融合数据实时映射，并能够高精度的对整机动态载荷进行仿真；
- 6) 应能够以直观的方式展示风电机组数字孪生模型状态和运行过程，助力实现风电机组实时状态监测、故障预警及排查等应用场景；
- 7) 应具有可预见性，能够通过仿真和对各部件运行特性高精度推演一定程度预测风电机组未来状态，用于风电机组预警、新型控制策略验证等应用场景；
- 8) 风电机组数字孪生模型机组级仿真精度应满足实际风电机组运行的感知、监测以及对未来的短期预测；
- 9) 风电机组数字孪生模型应具有包含智能算法的 API 数据接口，应能够有效连通风电机组各要素，应具备实时交互功能；
- 10) 应具有时效性、自适应性以及智能性，在运行过程中利用实时采集的运行数据实现模型结构和参数的自学习、自更新、自优化。

5.2 数据交互与存储技术要求

数据交互与存储应满足如下要求：

- 1) 应具备与机组实时、高效、准确、安全的数据交互能力，支持不同采样频率数据、信息的通讯及存储能力，包括转速、桨距角等低频数据及电压、频率等高频数据的实时通讯、存储；
- 2) 应具备数字孪生模型与机组之间的数字线程交互通讯能力，支持 TCP、UDP、HTTP、MQTT 和文件等至少 5 种数据流交互方式，支撑多类型数据快速流转和无缝集成；
- 3) 应具备支持云边端协同部署的能力，支持 OTA 下载；
- 4) 平台侧数据交互协议架构应能支撑服务平台与数字空间的数据交互，具备大规模数据存储及处理能力；
- 5) 平台侧通信网应支持海量多类型设备接入并能够对各设备模型统一定义，采用高度安全的通信协议和技术，具备高可靠性和稳定性；

- 6) 边缘侧数据交互协议架构应涵盖物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层五层，支撑业务数据需求；
- 7) 边缘网关应支持多类型终端接入，支持至少 2300+个点（1s 采集频率）1 个月原始数据的存储及批量化处理，具备数据加密和认证能力，适配 OPC、TCP/IP、UDP 等多种通信方式；
- 8) 应支持 TimescaleDB、PgSQL、Minio 等不同规模实时数据库的部署和使用，满足生产区、管理区相应信息安全等级保护要求；
- 9) 应支持设定时长和采样频率的历史数据采集、存储、调用和管理，并且配置国内主流数据库（如 TiDB、OceanBase、PolarDB 等）作为历史数据库平台；
- 10) 应支持多采样频率实时流数据的高保真通讯，支撑各类型业务功能对数据访问的实时性需求。

5.3 系统集成及仿真技术要求

仿真应满足如下要求：

- 1) 应能满足各级别实时仿真需求，如风机部件级、机组级实时仿真；
- 2) 应能配置模型组态以调整参数实现各种部件、机组仿真和调试；
- 3) 进行长时间数字孪生仿真时，应合理部署对应的风电机组数字孪生模型，并以实际风电机组输出来验证、优化和更新孪生模型，保证孪生模型输出的有效性；
- 4) 进行实时仿真时，应根据仿真任务需求合理选择部件级、机组级孪生模型，保证仿真计算的实时性；
- 5) 进行实时仿真时，应使用更新为与当前风电机组状态一致的孪生模型进行仿真；
- 6) 进行预测性仿真时，仿真过程耗时应控制在基于仿真的决策的时效范围内；
- 7) 进行验证性仿真时，应单独构建对应的风机孪生模型进行独立仿真；
- 8) 应具备实时仿真软硬件环境，如支持实时仿真的操作系统、应用软件的软件环境以及高算力和高性能的硬件环境。

5.4 可视化与人机交互技术要求

可视化与人机交互应满足如下要求：

- 1) 应满足设备级、机组级可视化，支持外形、材质、位置、动作等要素的状态可视化；
- 2) 应满足基于 3D 图像对物理风机和虚拟风机同步运行状态对比展示与分析；
- 3) 应满足支持图形、图表界面展示物理、虚拟风电机组运行流数据、历史数据；
- 4) 应满足支持特定场景设定、特定场景状态检测、特定测点数据调取和触控展示及特定状态预警展示；
- 5) 应满足支持系统组态、调试仿真、孪生模型参数设定、用户管理等操作；
- 6) 应满足支持多模态材料（文档、音频、视频、图像等）的采集和存储；
- 7) 应满足支持人机交互界面文字风格、界面风格、图像风格等风格的设计；
- 8) 应满足支持风电机组三维模型的渐进式动画展现、手动视角模型切换；

- 9) 应满足支持多种前后端双向数据通信协议在各类用户终端进行数据交换;
- 10) 应满足综合提供运行监视、三维模型展示、参数调整、设备预警、故障分析等多种能力。

5.5 文档要求

相关文档编写应满足如下要求:

- 1) 文档内容应描述清晰,包括使用的技术、步骤流程、参数配置、数据备忘以及其他需要注意的细节;
- 2) 文档应以统一的格式编写,包括各级标题、文本、图标以及表的格式。

6 风电机组数字孪生系统评价指标及量化方法

6.1 指标设立原则

建立风电机组数字孪生评价指标体系目的在于能够拥有一套全局的、系统性的指标量化评价方法能够准确、规范地评价风电机组数字孪生系统整体性能。指标设立应遵循以下原则:

- 1) 突出性:指标的设立和选取应侧重于风电机组数字孪生系统相较于传统风电机组的新增量特征,不应去和传统风电机组的共同特征;
- 2) 互斥性:每项指标原则上不与其他指标重复计算;
- 3) 可量化性:每项指标原则上应能够基于具体公式或方法进行量化计算;
- 4) 综合性:基于用户偏好和业务需求定制风电机组数字孪生系统综合评价方法。

6.2 指标权重确定原则

针对不同用户对风电机组数字孪生系统的各项性能的关注点不同,以及不同业务对风电机组数字孪生系统的各项性能的需求不同,科技与自定义权重的方式,定制风电机组数字孪生系统综合评价方法,指标权重的制定应遵循以下原则:

- 1) 指标权重取值范围应大于 0 且小于等于 1;
- 2) 指标权重取值应与业务重要程度、用户偏好程度成正比。

6.3 数据可采集性

数据可采集性是指风电机组及信息系统中可被采集获取的数据种类数量与数据种类总数的比值,是衡量风电机组是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式(1)。

$$\text{数据可采集性} = \frac{\text{可采集的风电机组数据种类个数} + \text{可获取的信息系统数据种类个数}}{\text{风电机组数据种类总数} + \text{信息系统数据种类总数}} \times 100\% \quad (1)$$

6.4 数据完备性

数据完备性是指风电机组孪生数据包括的数据种类个数去除重复的数据种类个数后与数据种类总数的比值，是衡量风电机组孪生数据是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式（2）。

$$\text{数据完备性} = \frac{\text{风电机组孪生数据种类个数} - \text{风电机组孪生数据重复种类个数}}{\text{风电机组数字孪生数据种类总数}} \times 100\% \quad (2)$$

6.5 数据准确性

数据准确性是指从风电机组数字孪生系统中测量得到的数据值与风电机组真实数据值差值的绝对值与可接受测量误差上限值的比值，是衡量测量数据是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式（3）。

$$\text{数据准确性} = \frac{|\text{风电机组数字孪生系统测得数据值} - \text{风电机组真实数据值}|}{\text{可接受测量误差上限值}} \times 100\% \quad (3)$$

6.6 数据交互一致性

数据交互一致性是指在数据交互过程中风电机组要素和要素孪生模型保持状态一致的数量与要素孪生模型总数的比值，是衡量数据交互是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式（4）。

$$\text{数据交互一致性} = \frac{\text{风电机组要素与相应要素孪生模型保持状态一致的组数}}{\text{要素孪生模型总数}} \times 100\% \quad (4)$$

6.7 数据交互实时性

数据交互实时性是指数据从风电机组和孪生模型的其中一端发出至另一端收到所耗费的时间与可接受时延上限值的比值，是衡量数据交互是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式（5）。

$$\text{数据交互实时性} = \frac{\text{数据在风电机组要素与要素孪生模型之间传输的时间}}{\text{可接受的时延上限值}} \times 100\% \quad (5)$$

6.8 信息直观性

信息直观性是指风电机组数字孪生系统中可直观显示的数据种类数量、要素孪生模型数量之和与数据种类总数、要素孪生模型总数之和的比值，是衡量可视化是否符合要求的指标之一。量化计算公式见式（6）。

$$\text{信息直观性} = \frac{\text{可显示数据种类个数} + \text{可显示要素孪生模型个数}}{\text{数据种类总数} + \text{要素孪生模型总数}} \times 100\% \quad (6)$$