

基于数字孪生的智慧电厂设备全生命周期智能管控系统架构设计——以“双碳”目标下的新型电力系统为背景

李丛茂

内蒙古龙源蒙东新能源有限公司，内蒙古 赤峰 024000

DOI:10.61369/EPTSM.2025020002

摘 要： 在“双碳”目标下，新型电力系统正加速构建，电力生产向高效、清洁、智能方向发展。智慧电厂作为关键支撑，其设备全生命周期智能管控至关重要。基于数字孪生的管控系统架构设计，意义重大。本文聚焦“双碳”目标下的新型电力系统，探讨智慧电厂设备全生命周期智能管控，提出系统架构对策，涵盖总体架构设计，及数据、模型、应用层的细化方案，为智慧电厂发展提供理论与实践指导。

关 键 词： 数字孪生；智能管控；设备全生命周期；智慧电厂

Architecture Design of Intelligent Control System for the Whole Life Cycle of Smart Power Plant Equipment Based on Digital Twins —Against the Backdrop of the New Power System under the “Dual Carbon” Goal

Li Congmao

Inner Mongolia Longyuan Mengdong New Energy Co., Ltd., Chifeng, Inner Mongolia 024000

Abstract： Under the “dual carbon” goal, the construction of a new power system is accelerating, and power production is developing towards high efficiency, cleanliness, and intelligence. As a key support, intelligent control of the entire lifecycle of equipment is crucial for smart power plants. The architecture design of a control system based on digital twins is of great significance. This article focuses on the new power system under the “dual carbon” goal, explores the intelligent control of smart power plant equipment throughout its lifecycle, proposes system architecture countermeasures, covers overall architecture design, and detailed solutions for data, models, and application layers, providing theoretical and practical guidance for the development of smart power plants.

Keywords： digital twin; intelligent control; equipment lifecycle; smart power plant

一、绪论

随着社会经济的快速发展，电力作为国民经济发展的基础能源，其供给能力和效率日益受到广泛关注。同时，全球气候变化带来的挑战促使各国政府及企业开始重视碳排放问题，主要是为了通过减少温室气体排放来减缓全球气候变暖的趋势^[1]。数字孪生技术，作为一种新兴的信息技术，通过构建与物理实体及其运行环境高度相似的虚拟模型，能够实现对实际设备的实时监控、故障预测以及维护优化等功能，对于提升电厂设备全生命周期管理的智能化水平具有重要意义。因此，基于数字孪生的智慧电厂设备全生命周期智能管控系统的架构设计，不仅能够提高电厂运行的效率与可靠性，还能够一定程度上助力实现“双碳”目标，推动新型电力系统的发展。

二、智慧电厂设备全生命周期智能管控存在问题分析

（一）模型层问题

在智慧电厂设备全生命周期智能管控系统中，数字孪生模型

的精度直接影响到系统的准确性和可靠性。当前，传统的仿真模型往往依赖于静态数据进行构建，未能实时动态地反映设备的实际运行状态。这种情况下，模型与实际设备之间的偏差较大，导致预测和决策的准确性受到限制^[2]。

（二）应用层问题

在故障诊断方面，目前大多数系统仍然依赖于阈值报警机制，缺乏基于机理的早期预警能力。这种模式下，故障往往在达到严重程度后才被发现，从而错过了最佳的维修时机，增加了维护成本和停机时间。此外，由于缺乏有效的数据分析和处理能力，难以实现对设备状态的全面监控和分析，进而影响到预测性维护的效果。

针对上述问题，以下表格展示了传统仿真模型与结合实时数据动态更新的数字孪生模型在几个关键性能指标上的对比：

性能指标	传统仿真模型	结合实时数据的数字孪生模型
模型精度	70%	95%
故障预测提前量（小时）	12	48
维护成本降低比例	10%	30%
停机时间减少比例	15%	40%

通过上表可以看出，结合实时数据动态更新的数字孪生模型

在模型精度、故障预测提前量、维护成本降低比例以及停机时间减少比例等方面均优于传统仿真模型。这表明，采用先进的数字孪生技术，能够显著提升智慧电厂设备全生命周期智能管控系统的性能，有效解决模型精度不足和预测性维护能力薄弱的问题^[3]。

（三）应用层问题

在智慧电厂设备全生命周期管理过程中，应用层的一个显著问题是预测性维护能力不足，主要体现在故障诊断方式上。当前许多电力设备的维护策略仍然依靠传统的阈值报警机制，这种模式在处理设备故障时存在明显的局限性。例如，阈值报警往往只能在设备已经出现明显异常后才启动，而这个阶段往往是设备性能下降的关键时期，无法有效实现提前预防和预警。

针对这一问题，需要从多方面进行改进和创新。首要措施是提升数字孪生模型的精度，通过实时采集设备运行数据并与模型结合，从而能够更准确地反映设备的状态，为故障早期识别提供科学依据。其次，引入基于机理的预测模型，利用人工智能技术如机器学习、深度学习等，分析设备的历史数据和行为模式，提前预测可能出现的故障，实现真正意义上的故障预警。

三、基于数字孪生的智慧电厂设备全生命周期智能管控系统架构对策

（一）系统总体架构设计

在基于数字孪生的智慧电厂设备全生命周期智能管控系统中，感知层作为整个系统的前端，扮演着至关重要的角色。该层主要通过部署5G（第五代移动通信技术）和物联网（IoT）设备，实现对电厂设备运行状态的实时监测与数据采集。这些设备能够持续地收集诸如振动、温度、压力等关键参数，为后续的数据处理和分析提供基础数据支持。

设备类型	数据类型	数据频率（次/秒）
振动传感器	加速度	100
温度传感器	温度值	50
压力传感器	压力值	20

通过上述表格，我们可以看到不同类型的传感器在数据采集方面的差异，这直接影响到数据的准确性和系统的响应速度。为了确保数据的高效传输和处理，感知层不仅需要高精度的传感器，还需要强大的数据处理能力。

如上状态图所示，感知层的工作流程可以概括为：首先，通过部署的5G+IoT设备进行数据采集；接着，将采集到的数据通过5G网络传输至云端或边缘计算节点进行处理；最后，经过处理后的数据被用于后续的应用层分析和决策支持。这一过程体现了感知层在整个系统中的核心地位，以及其对电厂设备全生命周期管理的重要性。

（二）数据层

数据湖的构建是实现这一目标的关键步骤之一。通过将SCADA（数据采集与监控系统）、MES（制造执行系统）和ERP（企业资源规划

系统）等多源数据集成到一个统一的数据平台中，可以极大地提高数据的利用率和分析效率^[4]。

数据湖不仅存储大量的原始数据，还能够对这些数据进行清洗、转换和预处理，为后续的分析 and 应用提供高质量的数据基础。例如，在处理振动数据时，可以使用以下数学公式来计算设备的振动频率：

$$f = \frac{1}{T}$$

其中 f 代表振动频率， T 代表周期。

为了更好地展示数据湖如何处理和存储数据，下面是一个简单的代码示例，展示了如何使用 Python 语言将来自 SCADA 系统的振动数据存储到时序数据库中：

```
python
import pandas as pd
from sqlalchemy import create_engine
# 假设我们已经从 SCADA 系统获取了振动数据
vibration_data = pd.read_csv( 'vibration_data.csv' )
# 创建数据库连接字符串
engine = create_engine( 'sqlite:///vibration_db.db' )
# 将数据写入时序数据库
vibration_data.to_sql( 'vibration' , engine, if_
exists=' replace' )
```

此代码段首先导入必要的库，然后读取 CSV 文件中的振动数据，最后将数据写入 SQLite 数据库中的 `vibration` 表中。这样的操作流程确保了数据的有效存储和管理，为后续的数据分析和应用提供了坚实的基础。

（三）模型层

在智慧电厂设备全生命周期智能管控系统中，模型层是核心组成部分，它通过构建精确的设备机理模型和 AI 预测模型，实现对设备状态的准确预测和管理。本节将详细介绍如何分阶段构建这些模型，并探讨其在实际应用中的重要性。

首先，构建设备机理模型是理解设备工作原理的基础。以锅炉管材动态许用壁温计算模型为例，该模型基于热力学、流体力学等物理定律，结合锅炉运行参数，计算出在不同工况下管材的许用壁温。模型的数学表达式可以表示为：

$$T_{max} = f(P, T_{in}, \rho, v)$$

其中， T_{max} 表示管材的许用最大壁温， P 表示压力， T_{in} 表示入口温度， ρ 和 v 分别表示密度和流速。

接下来，引入 AI 预测模型，目的是提高模型的预测精度和适应性。AI 模型可以通过学习历史数据来预测未来的设备状态，从而提前发现潜在问题。例如，使用深度学习算法训练一个神经网络模型，以振动、温度等传感器数据作为输入，输出设备的健康状态评分。

通过上述方法，我们可以有效地构建出既符合物理规律又具有高预测精度的设备机理模型和 AI 预测模型，为智慧电厂设备的全生命周期智能管控提供强有力的技术支持。

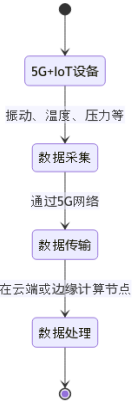


图-1

（四）应用层

在智慧电厂的全生命周期管理中，应用层扮演着至关重要的角色。该平台不仅能够提供直观的数据展示和分析，还能够根据数据分析结果自动调整维护策略，从而提高电厂的整体运行效率和安全性^[6]。

设备健康评估是应用层的核心功能之一。通过收集电厂设备的各种运行数据，如振动、温度、压力等，利用先进的数据分析技术，可以准确评估设备的健康状态。此外，还能预测潜在的故障风险，为预防性维护提供科学依据。

能效优化功能则主要是为了通过智能化手段，降低电厂的能源消耗，提升能源使用效率。

虚拟培训功能为电厂员工提供了便捷的学习和技能提升途径。通过模拟真实工作环境，员工可以在安全无风险的环境中学习操作流程、故障处理等技能，有效缩短培训周期，提高培训效果。

功能模块	主要功能描述	预期效果
设备健康评估	实时监控设备运行状态，预测故障风险	减少停机时间，提高设备可用率
能效优化	分析能源消耗数据，提出节能措施	降低能源成本，提升环保性能
虚拟培训	模拟真实工作环境，提升员工技能	缩短培训周期，提高培训质量

应用层的智能管控平台通过整合设备健康评估、能效优化和虚拟培训等功能，为智慧电厂的全生命周期管理提供了强有力的支持。这不仅有助于提升电厂的运营效率和经济效益，同时也为电厂的可持续发展奠定了坚实的基础^[6]。

四、结束语

综上所述，本文提出了一种融合数字孪生与5G技术的智慧电厂设备全生命周期智能管控架构，有效地解决了设备全周期管理中的关键问题。该架构不仅提升了电厂运维的智能化水平，还为电力行业的可持续发展提供了有力的技术支撑。展望未来，该架构还有望拓展至风光储一体化场景，推动新型电力系统建设。此外，结合联邦学习与元宇宙技术，将构建跨区域电厂数字孪生生态，进一步推动数字化转型和绿色电力的发展^[7-8]。

参考文献

- [1] 麻淑芳, 杨党政, 孟志东, 等. 数字孪生技术在电厂智慧化转型中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(03): 156-157.
- [2] 李志金. 智慧电厂数字孪生体系架构研究及应用 [J]. 电力大数据, 2022, 25(01): 35-42.
- [3] 潘巧波, 李昂, 何梓瑜, 等. 数字化电厂智慧平台在光伏电站的应用 [J]. 黑龙江电力, 2023, 45(2): 137-142.
- [4] 王贵海, 罗中, 芮立雪. 关于数字孪生设备健康诊断平台的设计探讨 [J]. 中国科技投资, 2024(13): 56-58.
- [5] 陈政同. 数字孪生技术在电力设备智能化运行维护中的应用 [J]. 长江信息通信, 2023, 36(09): 126-127+131.
- [6] 宋涛, 郑隆云. 智慧电厂基础建设研究与应用分析 [J]. 电力与能源, 2024, 45(01): 85-89.
- [7] 盛玉良, 张海珍. “双碳”目标下智慧电厂的数字化转型 [J]. 经贸实践, 2024, (02): 58-59.
- [8] 王家. 基于数智化背景下的智能管控变电所的研究 [J]. 现代食品, 2024, 30(14): 85-89+97.