

# 基于数字孪生技术的压缩机场站与管道系统智能化调控方法

王潘飞 朱磊 王博 (国家管网集团西北公司西安输油气分公司, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 数字孪生技术是一种利用数据和信息构建物理实体, 并将其在虚拟空间中重现的技术。数字孪生技术为油气生产过程优化、场站运营管理等提供了新思路。通过数字孪生技术, 可实现场站设备故障预测、维修计划编制、设备状态评价等功能。针对压缩机场站和管道系统运行调控智能化需求, 分析了数字孪生技术的研究现状与应用难点, 提出了基于数字孪生技术的压缩机场站与管道系统智能化调控方法, 建立了压缩机场站与管道系统全生命周期的数据模型, 通过数字孪生体实现了物理设备的远程监测和诊断、场站设备健康状况评价、维修计划编制与优化等功能, 并对智能调控方案进行了分析。

**关键词:** 数字孪生; 智能化调控; 压缩机场站; 管道系统

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 015-0105-03

## Intelligent control method for compressed airport stations and pipeline systems based on digital twin technology

Wang Panfei, Zhu Lei, and Wang Bo (Xi'an Oil and Gas Transportation Branch of National Pipeline Network Group Northwest Company, Xi'an Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** Digital twin technology is a technique that utilizes data and information to construct physical entities and reproduce them in virtual space. Digital twin technology provides new ideas for optimizing oil and gas production processes, as well as station operation management. Through digital twin technology, functions such as on-site equipment failure prediction, maintenance plan preparation, and equipment status evaluation can be realized. In response to the demand for intelligent operation and control of compressed airport stations and pipeline systems, this paper analyzes the research status and application difficulties of digital twin technology, proposes an intelligent control method for compressed airport stations and pipeline systems based on digital twin technology, establishes a data model for the entire life cycle of compressed airport stations and pipeline systems, realizes remote monitoring and diagnosis of physical equipment, evaluation of station equipment health status, and preparation and optimization of maintenance plans through digital twins, and analyzes the intelligent control scheme.

**Keywords:** digital twin; Intelligent regulation; Compressed airport station; Piping system

### 1 数字孪生技术

数字孪生是利用数字技术构建一个数字化的模型, 并在该模型中加入虚拟的实体, 使得虚拟的实体可以在物理世界中实现相应功能。数字孪生技术在工业领域应用广泛, 可以对工业过程进行全生命周期管理。基于数字孪生技术实现物理世界和虚拟空间的映射关系, 进而对物理实体进行状态监测、故障预测和控制。

目前, 国内外学者对数字孪生技术的研究主要集中在以下几个方面: ①构建数字孪生体模型; ②数字孪生体系统架构设计; ③数据驱动的数字孪生体系统建模技术; ④基于物联网的数字孪生体系统集成与应用; ⑤基于大数据技术的数字孪生体系统预测性维护。本文将针对以上内容进行分析。

#### 1.1 构建数字孪生体模型

目前, 国内外学者对数字孪生体模型的构建方法

主要有3种: 模型驱动 (ModelDriven)、数据驱动 (DataDriven) 和虚实融合 (Facilitating)。其中, 模型驱动主要是根据物理实体的具体结构以及物理实体的运行规律来构建虚拟模型, 然后利用数据驱动的方法来获取数据。模型驱动和数据驱动相结合, 可以将物理实体的状态变化映射到虚拟空间中, 从而对虚拟空间中的物理实体进行监控和维护。其中, 数据驱动是以历史数据为基础, 根据当前数据情况来对数字孪生体模型进行优化; 模型驱动主要是利用历史数据来构建虚拟模型, 然后再对虚拟模型进行优化, 从而提高虚拟实体的运行效率。

#### 1.2 数据驱动的数字孪生体系统建模技术

数字孪生体系统建模技术主要是根据真实物理过程进行构建, 通过数字建模技术将物理过程在虚拟空间中进行映射, 从而实现对物理实体的实时监控和故障预测。目前, 针对数字孪生体系统建模技术的研究

主要包括以下几个方面：①构建数字孪生体模型框架；②构建基于传感器、数据采集卡等硬件设备的物理系统；③构建基于云计算、大数据等软件平台的数字孪生体系统；④构建基于区块链、物联网等技术的数字孪生体系统；⑤构建基于人工智能、机器学习等技术的数字孪生体系统；⑥构建基于虚拟现实技术和增强现实技术的数字孪生体系统。通过这些研究，可以实现对物理实体进行实时监测和故障预测，从而达到数字孪生体系统预测性维护。

### 1.3 基于物联网的数字孪生体系统集成与应用

数字孪生体是基于物联网技术实现物理实体与虚拟实体之间的数据交互，利用传感器采集物理实体的各种信息，并对其进行数据分析。工业领域中有许多数字孪生体的应用，如在油气管道系统中，数字孪生体可以对管道的状态进行实时监测和分析，并基于传感器采集的信息对管道进行实时控制。在化工行业中，数字孪生体技术可以对化工生产过程进行优化。此外，在冶金行业中，数字孪生体技术可以对生产设备的运行状态进行实时监测和分析，并根据分析结果对设备进行预测性维护。

## 2 场站与管道系统调控智能化需求

随着我国“工业4.0”与“中国制造2025”的提出，数字化、网络化、智能化成为制造业转型升级的重要方向。油气行业作为能源系统中的核心，也是推动工业转型升级的关键领域。在数字化、网络化、智能化发展浪潮下，通过信息技术推动油气场站和管道系统调控智能化，是油气行业可持续发展的必由之路。目前，国内外已有大量研究探讨了数字孪生技术在油气行业场站和管道系统调控中的应用。如：美国能源署(EIA)于2019年启动了“智能天然气生产网络”项目，以提升油气生产效率，提高产品质量；美国能源部于2019年启动了“智能压缩机场站”项目，以增强美国境内现有的压缩机场站自动化程度与信息集成能力；欧洲石油和天然气工业协会(EIA)于2019年启动了“智能压缩机场站”项目，旨在利用数字化手段提高全球油气生产效率。

相比于传统的调控模式，基于数字孪生技术的调控模式具有如下优势：一是通过数字孪生技术可对物理实体进行模拟仿真，可实现物理实体全生命周期的数据采集和动态监测，可实现对设备故障、管道泄漏等信息进行预测。

二是可通过数字孪生体进行设备诊断与预测，能够及时发现设备潜在故障。

三是可通过数字孪生体进行维修计划编制与优化，提高场站设备维修效率。

四是可实现对设备健康状况的评价，以提高维修计划的制定效率。

目前数字孪生技术在油气场站和管道系统调控中应用还存在一些问题：一是当前大多数研究仅停留在虚拟世界中对真实世界的仿真模拟，很少涉及到真实世界的调控决策问题；二是现有研究大多局限于油气生产领域，缺乏对天然气管网调控、城市燃气管网调控等领域的研究。

鉴于上述问题和趋势，本文提出了基于数字孪生技术的压缩机场站和管道系统智能化调控方法：一是将数字孪生技术应用于压缩机场站和管道系统调控中；二是通过数字孪生体对物理实体进行监测和诊断；三是通过数字孪生体进行维修计划编制与优化；四是基于数字孪生体进行智能调控决策。本研究提出的智能调控方案主要包括以下内容：

## 3 数字孪生模型构建

压缩机场站和管道系统包含了物理设备、传感器、通信网络、监控系统等，通过采集与融合场站数据和传感器数据，可构建数字孪生模型。通过对场站物理设备和传感器的监测与分析，将物理设备的运行状态与异常信息进行传递和处理，建立数字孪生体模型。

构建数字孪生体模型时，首先需要获取物理设备和传感器的实时运行状态数据，对数据进行预处理和特征提取。通过对数据预处理后，得到物理设备运行状态的时空分布特征。利用特征提取算法对采集到的数据进行分析，获得故障影响因子、关键部件信息、故障发生位置等信息，构建数字孪生体模型。

数字孪生体模型是构建数字孪生系统的基础，需要从海量的数据中提取相关的关键特征信息。通过对数据进行预处理和特征提取后，在数字孪生体模型中建立了对应的物理设备、传感器和监控系统等物理实体模型。通过将采集到的数据传递到数字孪生体模型中，完成对物理实体的状态监测。在此基础上，通过数字孪生体模型对物理实体进行健康状况评价、维修计划编制与优化等功能。

### 3.1 数字孪生体模型

针对压缩机场站和管道系统的特点，在数字孪生体模型中可对设备状态、传感器数据、故障影响因子、关键部件信息和故障发生位置等进行定义。

压缩机场站的物理实体模型是指包含了压缩机设备及传感器等关键设备，包含了压缩机组及其附属设备和附属装置（如辅助系统）等。对于压缩机场站的物理实体模型，可根据实际需求进行优化和扩充。在数字孪生体模型中，可将物理实体模型中的相关设备定义为传感器。

为了提高数字孪生体模型的精度,在建立物理实体模型时,需要对不同部件和不同设备进行建模。由于压缩机场站设备种类繁多,包含了不同类型的传感器,因此在数字孪生体模型中可定义不同类型的传感器。在构建数字孪生体模型时,需要对传感器进行分类、分级和编码。

数字孪生体模型中包含了物理实体与传感器两个部分,可通过建立其对应关系来对物理实体进行建模。为了便于建立数字孪生体模型,在数字孪生体模型中定义了物理实体的相关信息以及传感器的相关信息。对于传感器数据采集需要获取传感器数据类型、类型转换等相关信息,并将其进行特征提取后输入到数字孪生体模型中。

### 3.2 数字孪生体模型中的数据分析与处理

在数字孪生体模型中,通过对采集到的数据进行处理与分析,得到相应状态信息,为物理实体的健康状况评价和维修计划编制提供支持。对于场站内运行设备、管道等物理实体而言,其健康状况评价主要包括:设备和管道的运行状态、运行规律以及设备的健康指标。对于监测到的数据进行分析,得到设备和管道的运行状态信息,为维修计划编制提供支持。在数字孪生体模型中,采用数据分析算法对数据进行分析和处理。

例如,对于设备运行规律的分析,可以采用回归分析算法获取设备在不同工况下的运行规律,可以用最小二乘法拟合出不同工况下设备运行规律。对于设备健康指标的分析,可以采用关联规则算法获取设备故障影响因子。利用该方法可以计算出不同工况下影响设备健康状况的关键因素,为后续维修计划编制提供支持。

## 4 智能调控方案分析

数字孪生技术为场站的运行调控提供了新思路,其研究成果可在数字孪生平台上进行展示,为场站运行调控提供新手段。然而,目前数字孪生技术在场站调控领域的应用仍处于起步阶段。数字孪生技术在场站智能化调控中的应用方案主要包括以下内容:①场站设备运行状态在线监测。场站设备运行状态在线监测是指通过传感器将物理空间的设备运行信息采集到数字空间,并对采集的信息进行处理和分析,得到设备在实际状态下的实时状态参数,从而指导场站设备的维修计划编制和优化;②场站设备健康状况评价;③数字孪生体仿真与控制;④基于数字孪生体的调控方法研究。基于数字孪生体技术的调控方法研究是指在数字孪生技术平台上,以物理空间中设备运行状态参数为基础,实现对物理空间中设备的实时监控、故

障诊断和健康评价。

### 4.1 场站设备运行状态在线监测

场站设备运行状态在线监测主要包括设备状态信息实时监测、故障诊断与健康评价、远程操控三部分内容。目前,压缩机场站设备运行状态在线监测主要采用传感器等物理手段,对压缩机设备运行状态进行实时监测。数字孪生技术为场站设备的实时监控提供了新手段,可以更准确地获取设备在实际运行中的状态参数,并通过采集数据进行处理与分析,得到压缩机设备在真实环境下的状态信息,从而指导场站设备的维修计划编制和优化。

此外,数字孪生技术可以通过与历史数据进行对比来判断设备的健康状况。当设备出现故障时,可以通过历史数据了解其健康状况,从而为场站管理人员提供决策依据。数字孪生技术还可以将数据存储在云平台上,便于管理人员随时查看数据,从而提高数据使用效率。

### 4.2 场站设备健康状况评价

数字孪生技术可以通过数字空间对场站设备的健康状况进行评价,为场站设备的维修计划编制和优化提供数据支撑。首先,将物理空间中压缩机的运行参数、振动、温度、压力等传感器数据采集到数字孪生技术平台,并将采集的数据通过网络传输到虚拟空间中进行处理。其次,根据数字孪生技术平台上的评价算法,对数据进行处理和分析,得到压缩机在实际运行状态下的实时状态参数,从而根据该参数对设备进行健康状况评价。最后,根据评价结果对场站设备的维修计划进行优化。例如,对于压缩机振动强度较大且振动源位置较为固定的情况,可在数字孪生技术平台上建立压缩机振动强度模型,通过物理空间中设备运行状态参数和数字孪生技术平台上运行状态参数的对比,分析得出影响压缩机振动强度的主要因素,进而指导维修计划的编制和优化。

### 参考文献:

- [1] 沈以赴,胡涨泉,周益民,等.基于数字孪生的热处理智能化技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2024,56(3):375-386.
- [2] 周亮,赵越.基于数字孪生技术的三维智能化系统设计[J].自动化与仪表,2024(2):163-166.
- [3] 沈以赴,胡涨泉,周益民,等.基于数字孪生的热处理智能化技术研究进展[J].南京航空航天大学学报,2024,56(3):375-386.
- [4] 陈渝,胡耀义,曹宏艳.一种基于数字孪生体的油气输送管道完整性管理方法[J].油气与新能源,2022,34(5):84-88.