

基于数字孪生的通信系统设计与仿真研究

徐至臻 刘庆泉 赵晨名

沈阳理工大学

DOI:10.12238/acair.v2i3.8615

[摘要] 本文介绍了在数字孪生系统中设计和实现一个通信仿真模型的过程,设计了一个仿真模型,模拟数字孪生系统中的通信环境,重点考虑了各种信道条件和通信参数。

[关键词] 数字孪生技术; 通信系统

中图分类号: TN914 文献标识码: A

Research on the Design and Simulation of Communication Systems Based on Digital Twins

Zhizhen Xu Qingquan Liu Chenming Zhao

Shenyang Ligong University

[Abstract] This article introduces the process of designing and implementing a communication simulation model within a digital twin system. A simulation model is designed to mimic the communication environment in the digital twin system, with a focus on various channel conditions and communication parameters.

[Key words] Digital Twin Technology; Communication System

引言

在数字孪生系统的构建与运行中,通信系统扮演着至关重要的角色。它负责在物理设备和其虚拟副本之间进行数据的实时传输和同步,确保虚拟模型能够准确反映物理实体的状态变化并进行有效的预测和控制^[1]。此外,这些系统不仅需要处理大量的数据,还要保证数据传输的安全性和实时性,以支持复杂的决策和操作。

本文将深入探讨数字孪生系统中通信系统的设计与仿真。文章首先阐述数字孪生系统中通信系统的基本要求和功能,接着介绍通信系统设计的关键技术,通过具体的仿真实验,本文将展示这些设计如何在实际应用中提高数据传输的效率和可靠性,并对系统性能进行优化。

通过这些研究,本文旨在为数字孪生系统的设计和实施提供实用的见解和方法,特别是在通信技术方面,以确保系统能够高效、安全地运行。这不仅对技术开发者有指导意义,也对行业应用者在实现数字化转型和提升运营效率方面提供支持。

1 数字孪生技术的发展历程

数字孪生的概念最早可以追溯到2002年,由美国国家航空航天局(NASA)的技术顾问Michael Grieves在其工作中提出。最初,这一概念被用于改进产品的生命周期管理,特别是在航空航天领域,通过创建复杂系统或产品的虚拟副本以实现更好的分析和预测。随着计算技术、数据分析和云计算的发展,数字孪生技术开始得到更广泛的研究和应用。例如,2003年NASA启动了“虚拟数字化助手”项目,目的是通过高级模拟和预测技术提高

航天器和航天任务的安全性和效率。2010年以后,随着物联网(IoT)技术的爆炸性增长,数字孪生技术开始扩展到制造业、能源、交通和医疗等多个领域。企业和研究机构开始探索如何利用数字孪生进行设备管理、优化运营和维护预测等应用。知名企业如通用电气(GE)和西门子等也开始将数字孪生作为其业务战略的一部分。到了2020年代,数字孪生技术已经成为工业4.0和智能制造的关键组成部分。它不仅应用于单个产品或设备的生命周期管理,还被用于整个系统乃至城市级别的复杂系统管理。此外,随着人工智能和机器学习技术的进一步发展,数字孪生的分析和预测能力也得到了显著提高,能够提供更为精准的决策支持。

2 数字孪生系统框架结构

数字孪生系统的框架结构通常包括几个关键组件,这些组件共同协作,以实现物理实体的实时模拟和分析。以下是本文提出的数字孪生系统的框架结构:

(1) 物理实体: 这是数字孪生系统的基础,指的是需要被模拟和监控的实际物理对象或过程。例如,它可以是一台机器、一座工厂、一个交通系统或任何其他实体。

(2) 数据采集层: 这一层负责从物理实体收集数据。这包括使用传感器、摄像头和其他测量设备实时收集关于物理实体状态和环境的数据。

(3) 通信层: 此层负责将收集到的数据传输到数字孪生模型。它可能包括各种网络协议和通信技术,如物联网(IoT)技术,确保数据的及时和安全传输。

(4) 数据处理与存储层：在这一层，收集来的数据将被处理和存储。数据处理可能包括数据清洗、格式化和预处理，以便于分析和模拟。数据存储则确保了数据的可访问性和历史数据的积累。

(5) 数字孪生模型：这是数字孪生系统的核心，通常是一个高度精确的计算模型，能够模拟物理实体的行为和性能。这个模型基于实时数据不断更新，以反映物理实体的当前状态。

(6) 分析和模拟层：在这一层，数字孪生模型被用来进行各种分析和模拟，以预测未来的行为，识别潜在的问题，或提出改进措施。这可以包括机器学习和人工智能算法，以增强模型的预测能力。

(7) 用户界面和交互层：最后，用户界面允许用户与数字孪生系统互动，查看模型输出、性能指标和分析结果。这层也可以支持用户输入，如调整参数或执行决策，从而影响物理实体或模型。

数字孪生系统通过这些组件的紧密协作，能够实现对物理世界的高度仿真和深入分析，为决策支持提供强大的技术支撑。

3 通信系统模型建立

数字孪生系统的通信系统是整个数字孪生框架中不可或缺的一部分，主要负责在物理实体和其数字孪生之间传输数据和信息。为了建立有效的数字孪生通信系统，我们需要考虑以下几个关键组成部分和步骤。

首先，数据采集是通信系统的基础。在通信系统建立前需要先确定哪些数据是必要的，这包括从物理设备采集的实时数据，如温度、压力、速度等传感器数据。数据采集通常通过各种传感器实现，这些传感器需要与物理设备紧密集成。其次，数据传输涉及将采集到的数据从物理设备传输到数字孪生系统。这通常需要一个可靠的网络系统，如使用无线技术(Wi-Fi, 5G等)或有线技术(以太网)。数据传输效率和安全性是重要考虑因素。可以采用加密技术保证数据在传输过程中的安全。数据到达数字孪生系统后，需要进行处理和存储。数据处理可能包括滤波、归一化等预处理步骤，以便于后续分析。数据存储则需要考虑数据的访问频率和存储成本，常用的技术有云存储和边缘存储。数字孪生系统不仅要实现数据的单向流动，还要能够对物理设备进行控制和优化。这需要通信系统支持反向通信，即从数字孪生传递控制命令到物理设备。这一过程中的时延和数据同步是需要严格控制的^[2]。

在数字孪生系统的通信过程中，数据的传输和转换涉及到两个主要的方向：从数字孪生到物理对象的通信，以及从物理对象回到数字孪生的通信。在这两个通信过程中，数据的形式和处理方法各不相同。

首先，从数字孪生体到物理对象的信息传输通常是数字量(见图1)。这意味着信息在传输前已经是经过数字化处理的数据，如控制信号或操作指令，这些都是以二进制形式存在。数字孪生通过分析 and 处理收集到的数据，生成对应的控制策略和优化建议，然后将这些决策以数字信号的形式发送给物理对象。这样的通信确保了信息的精确传递，同时也便于实现自动化和远程控制。

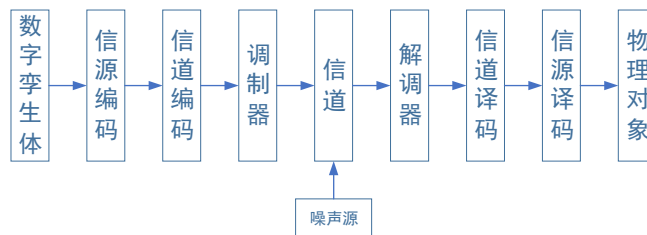


图1 数字孪生系统数字信号通信模型

而从物理对象到数字孪生的信息传输则主要是模拟量。物理对象上的各种传感器，如温度传感器、压力传感器或速度传感器，通常捕捉连续的物理量，这些物理量以模拟信号的形式存在。模拟信号反映了实时的、连续变化的物理状态，必须通过模数转换器(ADC)转换为数字信号，才能被数字孪生系统进一步处理和分析。这一转换过程是确保物理状态信息能够被数字孪生准确解读和应用的关键步骤。

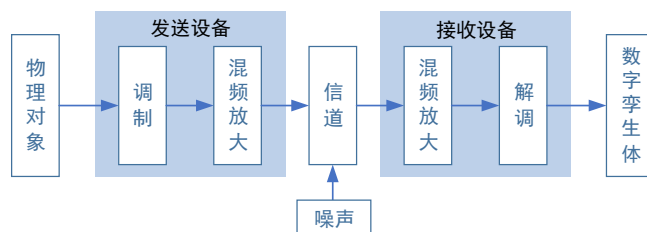


图2 数字孪生系统模拟信号通信模型

通过这样的数据转换和传输方式，数字孪生系统能够实现对物理对象的精准控制以及状态的实时监测，从而提高系统的整体效率和响应能力。在设计通信系统时，确保这两种转换过程的高效性和准确性是至关重要的。

4 实验与仿真

在构建一个针对工业生产线的数字孪生系统时，通信部分的仿真是至关重要的，因为它直接关系到系统的实时性能和可靠性^[3]。这个系统假设使用无线通信方式，无线信号在工业环境中通常受到多种因素的影响。经调研，其中多径效应和背景噪声为主要影响因素。

在数字孪生系统通信仿真实验中，我们首先要进行数据生成，生成的数据代表从数字孪生体到物理设备的控制信号或状态信息，通常这些数据以二进制形式表示。其次，为了在无线信道中有效传输，数据需要被调制。我们采用的调制技术为二进制相移键控(BPSK)，其调制公式为：

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi(1 - d_i)), d_i \in \{0, 1\}$$

式中， E_b 是每比特的能量， T_b 是比特持续时间， f_c 是载波频率， d_i 是发送的数据比特。

接着，我们进行多径信道模拟。多径效应是数字孪生系统中无线通信的常见现象，其中信号的不同副本在不同的路径上传播，然后在接收器处合成。这可以导致信号的相位和幅度的变

化。多径信道的响应可以用冲激响应表示:

$$h(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_k \delta(t - \tau_k)$$

式中, α_k 和 τ_k 分别是第 k 路径的衰减系数和时间延迟。信号在传输过程中不仅会受到来自多径效应的影响, 还会受到来自环境的随机噪声的干扰, 通常模型为 AWGN, 其功率谱密度 $N_0/2$ 。

接收到的信号需要解调以恢复原始数据, 解调可以简单地通过符号判决完成。误码率 (BER) 是衡量通信质量的重要指标, 计算公式为:

$$\text{BER} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 1(d_i \neq \hat{d}_i)$$

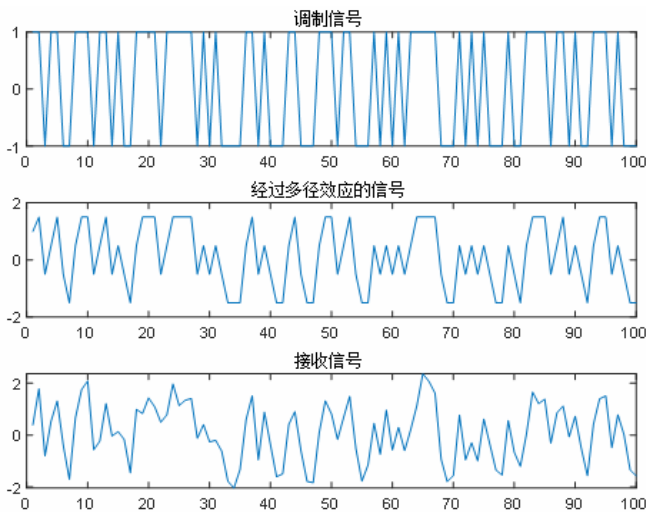


图3 数字孪生系统通信仿真

仿真结果如图3所示, 通过这种详细的仿真模型, 可以评估工业生产线上数字孪生系统在实际工业环境中的通信性能。这有助于工程师优化系统的设计, 以提高系统的可靠性和效率。

5 结论

通过本研究, 我们可以得出结论, 优化数字孪生系统中的通信协议和增强错误控制策略是确保系统可靠性和效率的关键。此外, 本文还为未来在类似系统中进一步提高数据传输效率和降低通信延迟提供了理论和实验基础。对于数字孪生系统的设计者和研究人员来说, 这些发现提供了宝贵的参考信息, 有助于他们在实际操作中作出更加精确的技术选择和调整。

[参考文献]

- [1]李媛,费泽松,晁子云,等.面向空天地一体化网络的数字孪生技术架构及应用[J].移动通信,2024(001):048.
- [2]王真.基于车间物联网的数字孪生运维分析系统设计与实现[J].科学与信息化,2021,(016):41-43,45.
- [3]Lun Tang,Wen Wen,Jinyu Li,Dongxu Fang,Li Li,Qianbin Chen,"Digital-Twin-Assisted VNF Mapping and Scheduling in SDN/NFV-Enabled Industrial IoT",IEEE Internet of Things Journal,vol.11,no.10,pp.18516-18533,2024.

作者简介:

徐至臻(1999--),男,汉族,江苏常州人,硕士,研究方向:探测控制有信息对抗。