

# 工业数字孪生技术在生产线虚拟调试中的应用与投产周期缩短实践

吴忠帮

绵阳亿丰达智能装备有限公司，四川省绵阳市，621000；

**摘要：**随着新一轮科技革命和产业变革加速演进，工业数字孪生技术在制造领域的应用越来越广泛。工业数字孪生是基于虚拟世界与物理世界的融合，通过建模仿真、数据集成、状态监测、优化分析等，实现物理世界与虚拟空间的同步，为制造过程的设计、工艺优化、质量控制、风险预测等提供支持。通过引入数字孪生技术，能够实现生产线设计、生产与运营全过程的数字化仿真与优化，提升生产线投产前的风险预警和效能提升能力。本文基于数字孪生技术的发展现状，重点介绍了数字孪生驱动下生产线虚拟调试的原理与流程，并结合实际案例探讨了其在生产线虚拟调试中的应用及成效。

**关键词：**工业数字孪生技术；生产线虚拟调试；投产周期缩短实践

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.094

## 引言

数字孪生（Digital Twin）是数字世界与物理世界融合的产物，是基于新一代信息技术对物理系统的数字化表达。数字孪生通过传感器获取物理系统的实时状态信息，并通过信息交互，将数据实时反馈给物理系统，实现物理世界与虚拟世界的同步。在数字化工厂的建设中，数字孪生技术可以作为一种数字化建模手段和分析工具，帮助用户更好地理解工厂或生产系统的运行机理与演化过程，实现对制造过程的在线监测、仿真模拟、优化决策、安全预警等。工业数字孪生技术在制造领域具有广阔应用前景，可助力生产线投产前的风险预警、效能提升与效能评估等。

## 1 数字孪生技术的基本概念与体系结构

数字孪生技术是在数字世界中，通过对物理实体的数字化表达，对其在数字世界中的行为进行模拟和仿真，以反映现实物理实体的运行状态，进而支持物理实体的决策、行动和运行。其本质是一种数据驱动的新型建模与仿真技术，将物理世界中的工厂、设备、生产线等作为模型，在数字空间中进行仿真和优化。数字孪生技术分为两个部分：一个是虚拟世界，一个是物理世界。物理世界是数字孪生技术所涉及的对象实体与环境；而虚拟世界则是数字孪生技术所模拟的对象实体与环境<sup>[1]</sup>。

## 2 工业数字孪生技术发展现状

数字孪生是基于对物理世界的仿真，对物理世界中的实体对象进行数字化表达，为用户提供虚拟空间中的仿真模型或虚拟仿真结果，并在此基础上进行物理实体对象的实时控制。从其在制造领域的应用来看，数字孪

生主要应用于产品生命周期管理、故障诊断与预测、智能运维等领域。当前，数字孪生技术在产品生命周期管理领域的应用主要是基于模型分析优化和过程优化两种模式。在故障诊断与预测方面，目前主要有基于深度学习、大数据分析等方法进行故障诊断与预测。在智能运维方面，以数字孪生技术为主进行研究与应用<sup>[2]</sup>。

## 3 生产线虚拟调试的原理与流程

### 3.1 生产线虚拟调试的定义与核心目标

生产线虚拟调试是基于对生产线的物理空间与虚拟空间进行同步，以实现对生产线进行动态仿真模拟，并在此基础上进行优化，以缩短投产周期、提高生产效率等为主要目的的数字化仿真技术与应用。其核心目标是在不改变设备和工艺的前提下，利用数字孪生技术建立虚拟空间中的生产线模型，在此基础上进行动态仿真与优化。其基本原理是通过将物理空间中的设备和工艺等数据导入数字孪生模型，并在此基础上进行动态仿真和优化，进而对生产线的整体性能进行分析，以帮助用户更好地了解生产线运行状态和优化生产过程。

### 3.2 虚拟调试的流程与关键环节（建模、仿真、优化、验证等）

生产线虚拟调试的流程包括：模型构建、数字孪生、动态仿真、数据集成、优化分析、结果验证等。其中，模型构建是生产线虚拟调试的基础，通过建立虚拟空间中的生产线模型，为后续的动态仿真与优化提供支撑。数字孪生是虚拟调试的核心，通过将物理实体与数字孪生模型进行同步，以实现对物理实体在虚拟空间中的运行状态进行模拟和分析。在生产线虚拟调试中，数字孪

生模型作为数据的载体，通过对物理实体数据的获取、转换与分析，可实现对物理实体的运行状态进行模拟和分析，并对其运行状态进行优化。最后将优化结果以数据格式进行存储与反馈。

### 3.3 传统调试与虚拟调试的对比分析

传统的调试方式，需要花费大量的人力物力进行现场调试，在调试过程中需要停机，不仅造成了大量的经济损失，也不利于快速投产。而虚拟调试只需在系统中搭建一个虚拟生产线模型，就可以实现生产线的运行情况、运行参数与故障诊断。通过虚拟调试，可以对生产线中可能存在的各种异常进行及时地排查与优化，从而大大提高了投产效率。例如在产品质量波动、设备异常等情况下，虚拟调试可以快速发现问题并给出解决方案；在复杂多变的生产环境中，虚拟调试还可以根据实际情况进行动态调整生产方案。通过虚拟调试可以大幅缩短生产线投产周期，并减少大量经济损失<sup>[3]</sup>。

### 3.4 虚拟调试对生产线设计与改造的支持作用

以某大型飞机零件加工生产线为例，该生产线投产至今已有 15 年，设备老化严重，仅有的几台数控机床无法满足生产需求，生产效率低下。原有生产线设计理念为：先加工零件、后装配。而通过虚拟调试方法，该生产线的加工过程被完整地模拟出来，并在虚拟环境中得到了验证。在此基础上，根据加工工艺要求，对数控机床进行了局部改造，将数控机床加工功能嵌入到原有的数控机床上。这样的改造方法不仅使整个生产线的设计更加科学合理、经济适用，而且避免了因更换设备而导致的设备损坏与停机带来的损失。

## 4 数字孪生驱动下的生产线虚拟调试应用实践

### 4.1 数字孪生模型的构建与数据集成

以某大型飞机零件加工生产线为例，在已有设备、工艺与组织结构的基础上，利用数字孪生技术，建立虚拟空间中的生产线模型。通过数据接口将生产线中的设备、工艺等数据接入系统，并在系统中实现对生产线模型的更新与维护。然后，利用该系统对生产线模型进行动态仿真与优化分析。根据虚拟调试结果，对生产线进行局部调整或优化。最后，将优化结果以数据格式存储到数据库中，以备后续进行数据分析与处理。此外，根据实际需求，在数字孪生模型中嵌入相应的数据库表、函数库等，并将其作为数据源集成到系统中，为后续的动态仿真与优化提供支撑。

### 4.2 虚拟调试系统的搭建与关键技术实现

系统基于工业互联网技术，可实现对生产线的实时状态监控，包括设备、工艺等数据的采集与上传，以及对生产线模型的更新与维护。同时，通过数字孪生技术

对生产线模型进行动态仿真与优化，实现对生产线的动态仿真与优化。该虚拟调试系统主要包括数字孪生模型管理、数字孪生模型更新、虚拟调试管理、系统管理和智能预警等模块。其中，数字孪生模型管理模块实现了对生产线模型的创建、更新与维护；虚拟调试管理模块实现了对生产线模型的动态仿真与优化；系统管理模块实现了对系统数据的管理。

### 4.3 虚拟调试全过程与协同机制

在虚拟调试过程中，设备维护人员、工艺工程师、产品工程师等均可通过系统协同，对生产线上的设备进行远程维护。基于数字孪生的虚拟调试过程中，所有人员都可以通过系统实时获取到设备的实时状态信息。因此，在系统中增加了故障树分析功能，用于模拟设备出现故障后的状态。该功能能够帮助用户快速定位故障原因，并进行故障诊断分析。同时，通过系统集成和数据交互机制，当某一设备或工艺发生故障时，虚拟调试系统可以将其信息反馈至生产现场的维修人员，根据系统给出的信息判断故障原因和需要解决的问题<sup>[4]</sup>。

### 4.4 典型案例分析：生产线虚拟调试流程与成效

以某汽车企业某款新车型的开发为例，该车型采用多工艺混流的生产方式，包括冲压、焊装、涂装、总装等四大工艺，其自动化率和工艺复杂程度分别为 97.9% 和 93.7%。由于新车型的开发时间短，要求工厂在短时间内完成新车型的设计与试制，并进行多次反复调试，以保证新车型能够顺利投产。由于产品结构复杂，对新车型的生产周期要求极高。该汽车企业为了缩短生产线调试时间，利用数字孪生技术建立了该生产线的数字孪生模型。该数字孪生模型包含了该车型所有零部件的三维模型、工艺文件等信息。利用该数字孪生模型结合虚拟仿真技术进行了生产线虚拟调试仿真。

### 4.5 投产前预测、优化与风险预警

虚拟调试需要在实际投产前进行预测，通过对生产设备、产品、环境、人员等因素进行综合分析，优化生产计划，提前进行设备检查、维护和故障诊断，在确保生产线正常运行的基础上，利用仿真手段提前预测生产中可能出现的问题并制定相应的解决方案。通过虚拟调试系统能够在线自动生成并下发计划，确保了产线投产前的质量稳定性。同时，虚拟调试系统可以在线自动检测工艺参数和设备状态，及时发现异常问题，并对异常情况进行预警和报警。例如，当设备发生报警时，系统会自动发出报警提示信息。经过实际验证，该系统可以提前 5 天左右发现和解决异常情况。

## 5 数字孪生助力投产周期缩短的实践分析

### 5.1 投产周期主要影响因素分析

以某汽车总装厂的汽车座椅生产线为例，生产规模为年产20 000辆，产品类型包括座椅骨架、侧围、后围，其中座椅骨架是主要生产工艺。从投产时间来看，座椅骨架的投产周期主要受工艺调试和生产准备两个因素影响。在工艺调试方面，由于生产线存在多品种、小批量、多规格、多工序、多功能等特点，使得车间需要大量的调试设备，需要配置相应的调试人员来保证生产线的正常运行。而在生产准备方面，由于生产线是按订单生产的，产品型号和规格变化频繁，需要对生产线进行全面的维护和改造。因此，这两个因素构成了影响投产周期的主要因素。

## 5.2 虚拟调试对投产周期缩短的作用机理

在虚拟调试系统中，数字孪生模型作为数据载体，可将生产线中的设备、工艺、人员等运行状态全部模拟出来，并与物理实体同步。同时，在系统中对生产线的运行状态进行分析，及时发现生产线可能存在的异常情况，并通过智能预警、故障诊断等功能进行实时响应。在虚拟调试系统的支撑下，可实现对生产线运行状态的模拟与优化，从而提高了生产准备的效率。此外，由于生产线是按订单生产的，因此在实际投产前可以对生产计划进行优化与调整。通过虚拟调试系统对生产计划的动态优化与调整，能够大幅缩短投产周期并减少经济损失。

## 5.3 关键指标对比与效果评估（时间、成本、质量等）

通过上述数字孪生技术在某汽车零部件制造企业生产线中的应用，可以看到，在虚拟调试中，工程师仅通过一套设备就可开展生产设备的调试，大大提高了工作效率。通过应用该技术，调试时间由原来的20~30 min缩短至5 min左右；通过应用该技术，质量问题反馈时间由原来的2~3d缩短至1~2h；通过应用该技术，在设备调试中可发现故障点，可避免因设备问题造成的返工和损失。实践表明，该技术能有效提升工作效率、减少生产成本和质量问题，有利于企业在生产过程中快速响应市场变化<sup>[5]</sup>。

## 5.4 经济效益与应用价值分析

经过以上对比分析，本项目的投产周期缩短效果显著，带来了显著的经济效益和应用价值。在不影响原有生产计划的情况下，通过数字孪生技术对生产线进行虚拟调试，可以缩短产品研制时间40%以上；对产线进行虚拟调试后，可以缩短产品研制周期30%以上。同时，

在企业数字化转型过程中，企业业务、管理模式、价值链、生态圈等均将发生深刻变革。通过数字孪生技术实现的虚拟调试为企业提供了一个完整的数字化的仿真验证环境，使得企业在设计和制造阶段就能提前发现问题和缺陷，从而将产品研发与生产过程中的不确定性因素降至最低，进而提高了企业的数字化转型能力。

## 5.5 应用推广中的挑战与对策

以数字孪生技术为代表的工业技术的推广应用，需要与生产管理和生产组织方式的变革相结合，通过数字化、智能化提升企业管理水平和效率，从而促进企业的生产效率和效益提升。然而，从工业数字孪生技术在工业领域中的应用现状来看，还面临着诸多挑战：一是工业数字孪生技术尚未成熟，尚未形成统一标准；二是缺少成熟案例和应用经验可以借鉴；三是缺少能够支撑数字孪生技术实现的基础设施和平台。针对这些问题，可以从以下方面进行探索和改进：一是开展相关领域研究，建立完善的工业数字孪生标准体系；二是推动基础设施建设；三是打造服务于数字孪生的技术平台。

## 6 结语

工业数字孪生技术是一种集成多种技术手段的综合应用，可以通过信息交互和数据共享，为企业提供了更加丰富的业务场景和更精准的决策分析。通过引入数字孪生技术，能够有效缩短生产线投产前的仿真调试时间，提升生产线运行效率与风险预警能力。随着5G、物联网、人工智能、边缘计算等新一代信息技术的发展与融合应用，将会进一步推动工业数字孪生技术的发展与成熟。

## 参考文献

- [1] 黄书经,何建华.基于数字孪生技术智能生产线的虚拟调试[J].模具制造,2025,25(04):17-19.
- [2] 马岳.基于数字孪生技术的机电一体化平台虚拟生产线与虚拟调试系统设计研究[J].造纸装备及材料,2024,53(11):115-117.
- [3] 牛虎利,杨硕,闫海鹏,等.基于数字孪生的套筒智能检测生产线虚拟调试技术[J].实验室研究与探索,2024,43(10):88-93.
- [4] 申浩浩.铝方型材包装产线工艺设备数字孪生体构建方法研究[D].河南工业大学,2024.
- [5] 张卿源.基于数字孪生的机电生产线虚拟调试数据映射研究[D].南京邮电大学,2023.