

《数字孪生技术及应用》课程大纲

卷、 培训时间：3天/期，6小时/天

式、 课程详细大纲：

1. 数字孪生的概念、应用现状与发展

1.1 数字孪生的概念及技术特征

1.1.1 数字孪生的概念诠释

1.1.2 数字孪生的技术特征

1.2 数字孪生技术的研究进展、应用现状与发展

1.2.1 数字孪生发展经历的阶段

1.2.1.1 技术准备期

1.2.1.2 概念制造期

1.2.1.3 预先应用期

1.2.2 数字孪生技术的标准及研究进展

1.2.3 数字孪生在不同行业的应用情况介绍

1.2.3.1 数字孪生在工业领域的应用-CPS（信息物理系统）、智能制造

1.2.3.2 数字孪生在建筑工程领域的应用-智能建筑

1.2.3.3 数字孪生在教育领域的应用-智慧教育、智慧课堂

1.2.3.4 数字孪生在智慧城市中的应用-城市大脑

1.2.3.5 数字孪生与物联网、工业互联网集成服务千行百业

1.2.3.6 数字孪生与大数据、人工智能融合服务于行业应用

1.2.3.7 数字孪生与区块链融合服务于行业应用

1.2.4 数字孪生技术的未来发展及行业应用拓展展望

2. 数字孪生的系统组成、模型及系统架构详解

2.1 数字孪生的系统组成三要素

2.1.1 物理空间的实体产品

2.1.2 虚拟空间的虚拟产品

2.1.3 物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口

2.2 数字孪生的概念模型（基于数字孪生的定义）

- 2.2.1 实体相关概念-物理实体（人工实体、自然实体、社会实体）、系统性实体、过程性实体
- 2.2.2 实体所在域相关概念-现实物理域、测量控制域、数字孪生域、用户域
- 2.2.3 数字孪生相关概念-数字孪生、数字孪生原型、数字孪生实例、数字孪生聚合、抽象实体、仿真引擎（数字模型、视觉特征、视觉类型；测量数据、控制信息）、模型数据融合引擎
- 2.2.4 数字线程相关概念-数字线程
- 2.2.5 数字孪生应用场景扩展相关概念-实体相关概念：（1）实体目的：目的、需求、需求指标；（2）实体时间：生存周期、生存期阶段；（3）实体空间：空间尺度、物资尺度类型、系统层次类型
- 2.3 数字孪生系统的通用参考架构（自底向上）-5个层次：现实物理域、测量与控制实体域、数字孪生域、用户域、跨域功能实体
 - 2.3.1 现实物理域（底层）-可观测的物理实体目标对象（测量数据流、控制信息流）
 - 2.3.2 测量与控制实体域（测量控制域）-测量物理对象的状态感知、对象控制
 - 2.3.3 数字孪生域-三大功能：建模管理、仿真服务、孪生共智
 - 2.3.3.1 建模管理：数字建模、模型展示、模型同步、运行管理
 - 2.3.3.2 仿真服务：模型仿真、分析服务、报告生成、平台支持
 - 2.3.3.3 孪生共智：资源接口、资源互操作、安全访问、在线插拔
 - 2.3.4 用户域-人、人机接口、应用软件、共智孪生
 - 2.3.5 跨域功能实体-信息交换、数据保证、安全保障
 - 2.3.5.1 信息交换-数字孪生域之间的信息交换
 - 2.3.5.2 数据保证与安全保障-数字孪生系统数据的准确性和完整性
 - 2.3.5.3 安全保障-数字孪生系统安保相关的认证、授权、保密和完整性
- 2.4 数字孪生应用场景的参考框架（基于数字孪生概念模型和参考架构）
 - 2.4.1 参考框架-三维空间：系统目的、系统层次/物质尺度、系统生存周期
 - 2.4.2 系统目的-全球化、城市化、工业化
 - 2.4.3 系统层次-体系、系统、子系统、系统元素
 - 2.4.4 物质尺度-宇观、遥观、宏观、显微观+介观、微观+渺观
 - 2.4.5 系统生存周期-技术预研、系统研制、运行服务、退役回放
- 2.5 数字孪生成熟度模型-数字孪生实现物理世界镜像、接受物理世界实时信息、实时驱动物理世界，进化为物理世界先知、先觉、超体

- 2.5.1 数化：物理世界的数字化建模（关键技术：建模/物联网）
- 2.5.2 互动：实时互传数据和信息（关键技术：物联网/数字线程）
- 2.5.3 先知：基于明确机理的计算（关键技术：仿真/科学计算）
- 2.5.4 先觉：基于不明确机理的推测（关键技术：大数据/机器学习）
- 2.5.5 共智：多孪生体共享智慧（关键技术：云计算/区块链）

3. 数字孪生的关键技术及应用

3.1 数字孪生的三项核心技术

3.1.1 数字孪生建模技术

3.1.2 数字孪生仿真技术

3.1.3 基于数据融合的数字线程（Digital Thread）技术

3.2 数字孪生的顶层框架技术-系统工程与 MBSE 技术（统领建模、仿真和数字线程技术）

3.3 数字孪生的底层伴生技术-物联网

3.4 数字孪生的外围使能技术

3.4.1 VR、AR 及 MR

3.4.2 云计算、雾计算及边缘计算

3.4.3 大数据、人工智能（机器学习）

3.4.4 区块链

3.4.5 数字孪生与人工智能的深度融合-实现信息空间与物理空间实时交互与融合

3.4.6 数字孪生与机器学习相结合-根据多重反馈源数据进行自我学习（传感器的反馈信息、历史数据、云平台的数据学习），实时地在数字世界里呈现物理实体的真实状况，推测和预演即将发生的事件

4. 数字孪生行业应用的技术实现方案、工具软件及案例分析（根据不同行业应用案例进行分析）

4.1 基于仿真软件的数字孪生 - 通用的工程技术仿真软件（如：Snsys、Matlab、Fmi、Altair、Modelica 等）

4.1.1 Ansys 数字孪生仿真软件-提供 twin builder 工具，用于数字孪生仿真建模

Ansys twin builder 的十大功能：多余系统建模器、广泛的 0D 应用程序库、第三方工具集成、降阶模型、嵌入式软件集成、多域系统求解器、HMI 原型快速制作、系统优化、XIL 合成、IIOT 连接

案例：水泵数字孪生案例：水泵设备数据-工业互联网 IIoT 平台（Thingworx 物联网平台）-Ansys 的水泵仿真模型-仿真结果返回 Thingworx 平台-仿真优化控制参数下发给水泵

4.1.2 Matlab 数字孪生仿真软件-定义模型（数据驱动模型），提供 Simulink 多域建模工具创建物理模型，训练数字孪生模型

Matlab 数字孪生与物联网的集成应用：（1）使用 Matlab 进行故障分类，（2）使用 Simulink/Simscape 数字孪生进行分析

案例分析：Matlab 数字孪生对三缸泵的故障诊断

三缸泵的传感器数据-微软 Azure 云平台（Kafka 消息中间件服务）-Matlab 的故障分类算法模型-模型根据传感器数据给出故障类型

应用场景案例：

- （1）商用卡车：根据驾驶数据日志和数字孪生，验证和调整 ABS 系统；
- （2）航空：航空发动机运营数据输入到数字孪生模型，制定维修计划、提高可用性、降低故障时间；
- （3）空间技术：数字孪生上传到卫星，用于卫星喷气推进器发生故障降级时重新调整控制方式；
- （4）工业自动化：采集数据经常性更新数字孪生模型，在工厂未来最优范围内运行时通知运营人员。

4.2 面向行业应用的仿真类软件-如：西门子可视化生产仿真、安德里兹工厂仿真软件、车联网交通仿真软件等

4.3 基于知识图谱的数字孪生-用于物联网上下文环境感知、自动推理

4.4 基于模型的企业 MBE-如洛克希德马丁的工厂 CAX 数字主线

4.5 自动化金字塔数字孪生-制造业基于自动化金字塔的、横向纵向的、信息化集成的数字孪生

4.6 基于公有云图数据库分析引擎的数字孪生-如：azure aws 智能空间图、阿里云的数字孪生

4.7 模型可视化数字孪生-可视化展示软件-如 Gis、BIM、Webgl 等

4.8 基于区块链的数字孪生-如：bigchaindb 等

4.9 基于 Chatbot 聊天机器人的数字孪生-如：罗克韦尔工厂设备的聊天机器人、微软的 healthbot，相当于医生的数字孪生

5. 数字孪生的应用场景及案例分析

5.1 基于系统生存周期维度的数字孪生应用场景举例

5.1.1 数字孪生的创建

5.1.2 对象系统的故障诊断

5.1.3 健康管理

5.2 基于系统目的和系统层次/物质尺度 2 个维度的应用场景举例

5.2.1 工业化数字孪生应用场景举例

- 5.2.1.1 工业化+宏观/体系维度应用场景：分布式制造、服务型制造、数字农业
- 5.2.1.2 工业化+宏观/系统维度应用场景：研发设计、智能车间/工厂
- 5.2.1.3 工业化+宏观/子系统维度应用场景：智能加工单元
- 5.2.1.4 工业化+显微观（+介观）/系统元素维度应用场景：集成计算材料工程、微纳制造、增材制造工艺仿真

5.2.2 城市化数字孪生应用场景举例

- 5.2.2.1 城市化+宏观/体系维度应用场景：数字孪生城市、智慧交通、智慧医疗、智能电网、智慧能源
- 5.2.2.2 城市化+宏观/系统维度应用场景：智能建筑
- 5.2.2.3 城市化+宏观/子系统维度应用场景：智能家居

5.2.3 全球化数字孪生应用场景举例

- 5.2.3.1 全球化+宏观/体系维度应用场景：面向产业集群的全球供应链网络、数字孪生政府、数字孪生战场
- 5.2.3.2 全球化+宏观/系统维度应用场景：单个产业的全球供应链网络

5.3 典型案例分析：数字孪生制造场景案例分析

5.3.1 数字孪生制造参考架构

- 5.3.1.1 现实物理域（底层）-人员、设备、试验、产品、材料、流程、环境、服务
- 5.3.1.2 测量与控制实体域（测量控制域）-测量感知（数据收集、数据预处理、数据标识）、对象控制（设备控制、设备执行、设备标识）
- 5.3.1.3 制造物理域数字孪生组件-人员、设备、试验、产品、材料、流程、环境、服务
- 5.3.1.4 数字孪生域-三大功能：建模管理、仿真服务、孪生共智
 - 5.3.1.4.1 建模管理：数字建模、模型展示、模型同步、运行管理
 - 5.3.1.4.2 仿真服务：模型仿真、分析服务、报告生成、平台支持
 - 5.3.1.4.3 孪生共智：资源接口、资源互操作、安全访问、在线插拔
- 5.3.1.5 用户域-人、人机接口、应用软件、共智孪生
- 5.3.1.6 跨域功能实体-信息交换、数据保证、安全保障
 - 5.3.1.6.1 信息交换-数字孪生域之间的信息交换
 - 5.3.1.6.2 数据保证与安全保障-数字孪生系统数据的准确性和完整性

5.3.1.6.3 安全保障-数字孪生系统安保相关的认证、授权、保密和完整性

5.3.1.7 数字孪生制造的成熟度特征

5.3.2 数字孪生制造的关键技术

5.3.2.1 建模-CAD (计算机辅助设计) 技术

5.3.2.2 仿真-CAE (计算机辅助工程) 技术、工艺仿真技术、工厂仿真技术

5.3.2.3 工业控制技术

5.3.2.4 辅助制造-CAM (计算机辅助制造) 技术

5.3.2.5 制造执行-MES (制造执行系统) 技术

5.3.2.6 产品全生命周期管理-PLM (产品全生命周期管理) 技术

5.3.2.7 企业资源管理-ERP (企业资源计划) 技术

5.3.3 数字孪生制造的典型应用场景

5.3.3.1 研发设计

5.3.3.2 生产制造

5.3.4 数字孪生制造的典型应用案例

5.3.4.1 ABB 利用数字孪生设计物料堆放场

5.3.4.2 数字孪生机床

5.3.4.3 水泵运行的数字孪生

5.3.4.4 超临界二氧化碳循环的数字孪生

6. 数字孪生与通信网络的融合应用

6.1 数字孪生对通信网络的需求分析

6.1.1 数字孪生对通信网络的网络性能指标要求-带宽、时延、连接数、可靠性、安全

6.1.2 数字孪生与物联网平台的集成-数据采集、设备管理、连接管理、数据分析、应用使能

6.1.3 数字孪生的数据处理能力-计算能力 (快速数据处理能力)、算法、数据存储

6.1.4 数字孪生对未来网络的要求预期分析

6.2 数字孪生对未来网络的改变-新的网络架构：定义数字孪生网络、数字孪生与多种技术的融合

7. 通信网络数字孪生系统分层体系架构的组成、功能及应用

7.1 通信网络数字孪生系统分层体系架构的组成 (自下而上)

7.1.1 网络层：物理网络、虚拟化网络

7.1.2 数据采集层：传感器网络、数据采集

- 7.1.3 数据层：数据库与数据存储
- 7.1.4 数字孪生建模层：AI引擎、机器学习、3D/4D图形可视化
- 7.1.5 应用层：智能应用

7.2 通信网络数字孪生系统的功能及应用

- 7.2.1 “0”运维
- 7.2.2 可视化
- 7.2.3 自由化
- 7.2.4 自编排
- 7.2.5 自演进

8. 数字孪生在网络运维中的应用

8.1 数字孪生实现网络状态预测与自动优化

- 8.1.1 总体工作流程：规划-建设-优化-监控
- 8.1.2 数字域事前试验：实施方案迭代寻优，保证物理网络实施效果
- 8.1.3 数据采集：网络域-跨系统域-系统域-网元域-微模块
- 8.1.4 数据处理：规划-试验-执行-预测
- 8.1.5 数字孪生实现网络智能策略服务（自动化操作）
 - 8.1.5.1 服务自编排
 - 8.1.5.2 硬件自启闭
 - 8.1.5.3 故障自愈
 - 8.1.5.4 参数自由化

8.2 运用数字孪生体进行网络预测性维护的方法、步骤及流程

- 8.2.1 构建数字孪生体：传感器采集数据，通过网络模型构建待预测网络设备的数字孪生体模型
- 8.2.2 获取数据：通过外部传感器采集数据，获取数字孪生体模型中的参数
- 8.2.3 数据预处理：对数字孪生体模型中的参数数据进行预处理
- 8.2.4 开发预测模型：构建预测模型-（1）将网络故障组件的行为添加到待预测网络设备的数字孪生体模型中；（2）通过模拟网络故障因素对待预测的网络设备进行检测；（3）在仿真工具软件中使用快速重启功能，以减少仿真时间，并输出仿真结果，利用仿真结果提取训练数据用于机器学习。）
- 8.2.5 部署算法：对需预测的网络设备进行评估，得出网络设备故障风险，提供网络预测性维护措施

9. 课程总结：

- (1) 重点知识回顾与总结；
- (2) 互动与讨论：问与答。

就学员提出的问题进行分析、讨论、模拟演练和点评。

参、 讲师介绍

李文耀：副教授，硕士生导师，全国优秀教师。1991年毕业于北京邮电大学，国内通信行业精通各种通信网络与技术的网络专家、技术专家，全国通信行业资深讲师，高级网络架构师、高级咨询师，工业和信息化部通信行业职业技能鉴定中心考评员，中国 NB-IoT 产业联盟专家组成员，武汉邮电科学研究院·烽火科技集团高级培训师，《中国光电》杂志、中国光电网（www.optochina.net）编委会成员，《通信世界》杂志特邀撰稿人，被评为 2011-2012 年度通信产业先锋技术人物，2012 年全国通信行业“金牌培训讲师”。

长期从事电信运营商的通信技术咨询、交流与培训，研究生、本专本科生、通信企业员工培训、用户培训和援外培训的教学与科研工作；多次参与工业和信息化部通信行业职业技能鉴定中心有关通信行业职工通信技术技能鉴定工作；多次参与国内外主要设备制造商、中国电信、中国移动与中国联通三大电信运营商、通信网络规划与设计单位、通信网络工程建设与维护单位、广电与电力行业通信部门等的通信新技术交流、咨询与培训工作。在 5G、NB-IoT、物联网、云计算、大数据、人工智能、智慧城市、智慧社区、智能小区、智能家居、互联网、移动互联网等领域有一定的造诣和工程建设实践经验。

诚实做人，学识渊博、知识结构全面、亲和力强、在业界有一定影响。既有雄厚而扎实的理论基础、精湛而熟练的技术、又有丰富的理论及实践教学经验和技巧、做过项目课题、产品研发、还参加过通信网络的规划与设计、通信工程建设、网络运维及新业务开发等工作。

在长期的教学与培训实践中形成了独具特色、自成体系的教学风格和教学方法，最大特点在于以人文的思想与方法进行教学，生动活泼，富于激情与感染力；教学针对性强，知识全面、思路清晰、逻辑严密、结合丰富的案例进行教学，深入浅出、诙谐幽默；通过互动教学，解决学员在实际工作中遇到的各种问题，让学员在短时间内取得较大收获。学员上万人，遍及国内外通信行业，广电与电力行业，学员对教学效果评估，满意率均达 90% 以上。

曾主持并参与部级科研课题 5 项，省级科研项目 10 项，与他人合著技术参考书 2 部，在国内外刊物上发表论文 20 多篇，多次获奖。