



03 期

2026年

FANG ZHEN TIAN DI

仿真天地

主办：中国仿真学会

- 光学成像半实物仿真：让相机在“虚拟世界”里接受真实考验

—— 中国仿真学会仿真方法与建模专业委员会

- 具身智能的数据从哪里来

—— 数据采集范式、虚拟仿真与工程应用综合实训平台实践

中国仿真学会新型工业虚拟实训仿真专业委员会

- 综合能源系统数字孪生：给能源系统做个“数字双胞胎”

—— 中国仿真学会综合能源系统数字孪生专业委员会

编者按



随着科学技术不断发展，仿真科学已成功地应用于工业、农业、商业、教育、军事、交通、社会、经济、医学、生命、生活服务等众多领域，并发挥着重要的不可替代的作用。仿真科学已经成为继理论和实验 / 观察这两种传统的科学研究范式之后第三种科学研究范式。为进一步加强中国仿真学会科普工作，学会推出《仿真天地》科普专栏，旨在以浅显、通俗易懂的方式，让公众接受仿真科学知识、推广仿真科学技术的应用，倡导科学方法、传播科学思想与弘扬科学精神。

本期推荐《光学成像半实物仿真：让相机在“虚拟世界”里接受真实考验》、《具身智能的数据从哪里来——数据采集范式、虚拟仿真与工程应用综合实训平台实践》、《综合能源系统数字孪生：给能源系统做个“数字双胞胎”》三篇文章。



光学成像半实物仿真：让相机在“虚拟世界”里接受真实考验

——中国仿真学会仿真方法与建模专业委员会 / P1

具身智能的数据从哪里来——数据采集范式、虚拟仿真与工程应用综合实训平台实践

——中国仿真学会新型工业虚拟实训仿真专业委员会 / P6

综合能源系统数字孪生：给能源系统做个“数字双胞胎”

——中国仿真学会综合能源系统数字孪生专业委员会 / P14

光学成像半实物仿真：让相机在“虚拟世界”里接受真实考验

中国仿真学会仿真方法与建模专业委员会

当我们谈到仿真，很多人首先想到的是计算机屏幕上的数字模型：飞机在虚拟天空中飞行，卫星围绕地球运行，机器人在数字地图中穿梭。但对于光学相机、红外探测器等真实传感器来说，仅仅让计算机“模拟出一组数据”往往还远远不够。一台真实的光学载荷究竟能不能看清目标？面对强光、弱光、复杂背景、运动模糊以及不同距离下的目标，它会产生怎样的图像？后端的识别、定位和导航算法，又能否稳定可靠地工作？要回答这些问题，就需要一种连接“虚拟世界”与“真实设备”的技术——光学成像半实物仿真^[1]。

一、什么是光学成像半实物仿真？

简单来说，光学成像半实物仿真就是：让真实的光学设备置身于实验室之中，但它所“看到”的世界，却由计算机实时构造生成。这里包含三个关键词。“光学成像”，指的是目标发出或反射的光，经过光学系统、探测器等环节，最终形成数字图像的完整过程；“半实物”，意味着系统并非完全由计算机模拟，而是把真实的硬件设备接入仿真回路；“仿真”，则是利用数学模型和计算机实时计算，构造出目标、运动、光照和空间环境等条件。因此，这项技术本质上是一种“虚拟环境+真实传感器+实时闭环”的实验方法^[2]。

举例来说，如果我们要测试一颗用于小行星探测的相机，直接将它送入太空进行实验，成本极高且难以重复。而采用半实物仿真后，可以在实验室里让计算机模拟一颗快速旋转的小行星，并根据探测器的虚拟位置实时生成目标图像，再通过光学场景模拟设备将这幅虚拟场景“投射”给真实相机。相机并不知道身处实验室，它只会按照真实的光学规律完成成像。这就是半实物仿真的核心思想。

二、与纯数字仿真有什么区别？

传统数字仿真通常是“模型对模型”。例如，我们可以建立一个相机模型：目标→光学系统→探测器→图像。计算机根据目标距离、姿态、光照等参数，直接计算出一幅模拟图像。这种方法成本低、效率高，非常适合早期算法研究。但问题在于，真实相机远比数学模型复杂。实际成像过程中，镜头畸变、焦距误差、噪声、非均匀响应、曝光变化、动态范围限制以及电子学误差等诸多因素，都很难被数学模型完全刻画。一个看起来非常准确的仿真结果，可能无法复现真实设备的行为^[3]。

半实物仿真的核心优势，恰恰在于把真实硬件放入仿真回路。例如，可以让真实相机完成实际的曝光、光电转换、模数转换和图像输出，再将真实图像送入真实的目标识别、视觉导航或姿态估计算法。这样一来，测试的对象就不再只是“算法模型”，而是包括传感器、电路、处理器在内的完整系统。

三、典型的半实物仿真系统长什么样？

一个完整的光学成像半实物仿真系统，通常由以下几个部分构成，如下图所示。

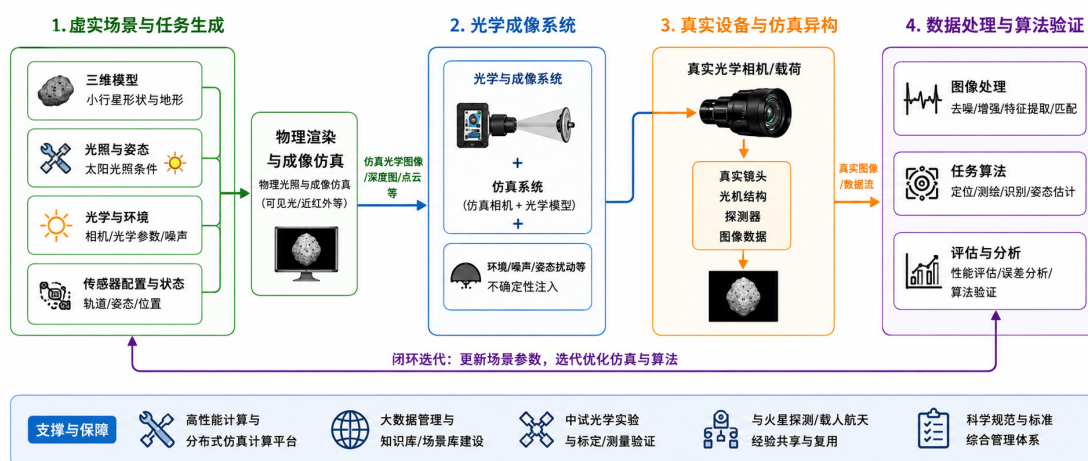


图1 光学成像半实物仿真系统示意图

（1）数字场景与运动仿真

首先由计算机建立一个虚拟世界。在这个世界中，可以设定目标的形状、尺寸和表面纹理，配置目标与相机之间的距离，定义目标和探测器的相对运动，调节目标姿态及旋转状态，设置太阳、地球等光源的位置，以及构建环境背景和遮挡关系^[4]。

例如，在小行星着陆任务中，可以建立一颗几十米尺度的小行星，让它按照设定的自转状态运动，同时模拟探测器逐渐接近小行星的过程。随着探测器位置不断变化，目标在相机视场中的大小、位置和姿态也会随之动态更新。

（2）光学场景模拟

计算机生成的数字图像不能直接让真实相机“看到”，因此需要一个极为关键的环节——光学场景模拟器^[5]。它的作用可以理解为一台“虚拟世界投影仪”：计算机首先计算出某一时刻真实相机应该接收到的光学场景，然后由显示源、准直光学系统等设备，将这个场景转换为符合真实光学特性的入射光。与普通显示器不同，它并非简单地“播放一张图片”，而是尽可能复现真实目标经过实际光路后进入相机的状态。正因如此，光学场景模拟成为半实物仿真区别于普通数字图像测试的重要标志。

（3）真实光学载荷

接下来轮到真正的“主角”——被测相机。真实相机接收到模拟场景后，会像在实际任务中一样完成成像，经历真实的曝光过程、光学成像、探测器响应以及电子噪声影响，最终输出真实的图像。这意味着研究人员可以观察到：这台真实相机在这种特定环境下到底能看到什么，而不只是观察计算机模型预测它应该看到什么。

（4）图像处理与任务算法

真实相机输出的图像还可以继续送入真实的算法系统进行处理。例如：图像→目标检测→特征提取→目标识别→位姿估计→导航决策。对于空间探测任务，还可以进一步执行：图像→小行星轮廓提取→相对位置估计→姿态估计→着陆区域识别。这样一来，半实物仿真便从“测试一台相机”升级为“测试整个自主系统”^[6]。

（5）实时反馈

真正高阶的半实物仿真并非单向播放。举例来说，相机发现目标后，视觉导航算法计算出探测器当前的位置和姿态；控制系统根据估计结果调整探测器的运动；仿真计算机再根据新的运动状态重新生成下一时刻的目标场景。于是形成一个完整的闭环：仿真环境→光学场景→真实相机→图像算法→状态估计→控制系统→仿真环境。这就是所谓的闭环半实物仿真。

四、半实物仿真究竟能测试什么？

航天任务最昂贵的事情之一，就是发现问题太晚。如果一个算法直到真正飞行之后才发现

某种特殊光照条件下无法稳定工作，那么修改和重新验证的代价将极其高昂。半实物仿真提供了一种更为经济的思路：把昂贵的真实任务尽可能提前搬到实验室中^[1]。在这里，研究人员可以快速修改参数、重复实验、制造极端环境，在真正执行任务之前，让系统经历大量“极端考试”：

- 测试复杂光照：例如太阳光直接照射目标，或目标处于阴影区域。通过改变太阳入射角，可以评估相机在不同光照条件下是否仍能准确识别目标。

- 测试运动模糊：当探测器运动速度较高或目标快速旋转时，相机可能产生明显的运动模糊。通过改变运动参数，可以测试图像算法对模糊图像的适应能力。

- 测试弱小目标：当目标距离非常远时，它可能只占据图像中的寥寥数个像素。研究人员可以逐步增加目标距离，观察相机在何时开始无法可靠检测目标。

- 测试复杂背景：例如在深空环境中，目标可能与黑暗背景、恒星或其他天体背景同时出现。通过改变背景条件，可以检验目标检测和识别算法在面对复杂环境时的鲁棒性。

- 测试故障与极端情况：例如图像质量下降、传感器噪声增加、部分区域饱和、目标短时间丢失等。

在实验室中可以反复制造这些情况，而无需承担真实飞行任务的风险。更重要的是，半实物仿真能够同时连接理论模型、仿真软件、真实传感器、真实计算机和真实控制系统。因此，它实际上是连接“理论研究”与“工程应用”的关键桥梁。

五、未来的光学成像半实物仿真

从技术发展角度看，验证过程大致可分为三个阶段。第一阶段是纯数字仿真，所有对象均为数学模型，成本低，适合验证理论和算法。第二阶段是半实物仿真，将真实相机、计算平台、导航算法乃至控制器接入仿真系统，检验软硬件协同工作的能力。第三阶段是真实环境实验和飞行验证，最终进入真实场景，检验系统面对真实环境的综合能力。由此可见，半实物仿真并非要取代真实实验，而是在两者之间建立一个重要的“缓冲区”，使研究人员能够在真正迈入高成本、高风险环境之前，对系统进行更为充分的验证。

随着人工智能、实时渲染和高性能计算的不断进步，未来的半实物仿真将愈发接近真实世界。一方面，场景模拟将更加逼真，复杂地形、材料反射、动态光照和大规模三维环境都可实时生成。另一方面，仿真系统将更加智能，人工智能可以自动生成大量具有挑战性的测试场景，主动寻找算法最易失效的情形。对于空间自主探测而言，未来甚至有望建立从目标环境建模→光学成像→图像理解→状态估计→自主决策→飞行控制的完整闭环实验平台。届时，研究人员

测试的将不再仅仅是一台相机或一个算法，而是一个能够自主感知、判断和行动的完整智能探测系统。

参考文献

- [1] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [2] 李明譔, 江刚武, 张锐, 张一. 航天光学遥感成像半实物仿真系统研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 617~623.
- [3] 杨宝庆, 马杰, 姚郁. 飞行器半实物仿真装备研究进展与展望 [J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 9.
- [4] 高彦泽, 陆俊杰, 李仁杰, 等. 光学目标模拟器综述 (封面文章·特邀) [J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 15-32.
- [5] 李泽宣, 杨旺林, 金尚忠, 吴柯萱, 徐紫薇. 紧凑型红外模拟器的光机系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2024(7): 205-213.
- [6] 郝凯子, 杜渐, 马静, 等. 射频/光学复合制导半实物仿真研究进展 [C]// 第三十五届中国仿真大会. 复杂系统建模与仿真全国重点实验室北京仿真中心, 2023.

具身智能的数据从哪里来

——数据采集范式、虚拟仿真与工程应用综合实训平台实践

中国仿真学会新型工业虚拟实训仿真专业委员会

一、引言

人工智能正逐步从软件端智能向具备物理实体的实体智能方向发展。大语言模型可对相关问题进行问答分析，却无法完成抓取杯子的实体操作；可以描述拧螺丝装配的操作步骤，却无法实际完成装配作业。让智能体拥有物理实体，在与环境的交互中开展学习、持续迭代优化直至完成任务，正是具身智能（Embodied Intelligence）的研究目标^[1]。大语言模型的发展得益于源自互联网的海量文本数据，业界普遍期望具身智能可复制该发展路径，但互联网中几乎不存在可直接用于机器人训练的交互数据：一个抓取动作不仅需要视频图像素材，还需要各关节角度、夹持力度与接触反馈数据，这类信息无法从普通视频中获取，也无法凭空生成，必须经过专门采集或合成。因此，数据来源问题已经成为具身智能发展最基础的核心问题。本文围绕数据为何稀缺、数据有哪些采集来源、仿真如何生成训练数据、工程层面如何落地四个问题展开科普分析。

二、具身智能数据为何稀缺

2.1 从旁观式记录到第一人称交互

网络文本和视频属于第三方旁观所得的静态记录：镜头拍下他人倒水，却无法体现手部发力、杯体重量与关节配合。机器人训练所需的则是第一人称的操作记录——任一时段的感知、动作与环境反馈都要一一对应，画面、关节角、夹持状态、力矩、触觉与毫秒级时戳必须严格同步。正因如此，这类数据无法借助爬虫从网络批量获取，行业几乎要从零起步积累。

2.2 供需落差与不可能三角

具身模型参数增量极大，已达数亿量级，训练具备通用能力的模型估计至少需要百万小时级真实交互数据，而现有成熟数据集仅几十万小时量级，供需存在数量级落差^[2]。此外，数据与机体型号深度绑定：自由度、臂长、传感器分布的差异，使面向某一机械臂采集的记录难以迁移到其他构型，数据零散分布、不易汇聚成规模。业界由此总结出数据生产的不可能三角——品质、规模与代价三者通常无法兼顾，其关系如图 1 所示：真机遥操作品质最优却昂贵且缓慢；视频和低精度仿真便宜、易扩量，但动作标签粗糙，据此训练的模型往往演示时像样、实机执行却缺乏稳定性。由此可见，问题并非在于样本总量不足，而是缺少能够支撑复杂物理过程推理、模态齐全、可时间对齐并跨机体复用的优质数据。

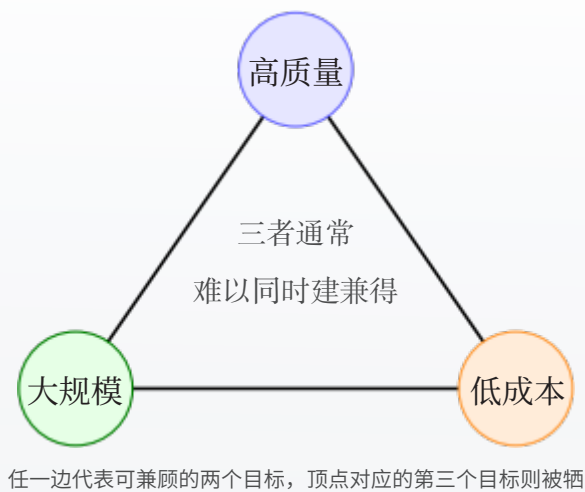


图 1 具身智能数据生产的不可能三角

三、具身智能数据采集的主要范式

3.1 真机遥操作：质量最高的示教数据

操作员通过主端设备（同构主手、VR 手柄、外骨骼或 3D 鼠标）远程控制真实机器人，系统同步记录全部画面、关节角度、力矩、夹爪状态与操作指令。由于数据来自真人在真机上完成真实任务，观测一动作对应精确、物理信息完整，是精细力控任务训练与最终微调的黄金标准，低成本开源双臂遥操作系统的普及也验证了这一路线的有效性^[3]；其短板是速度受人力时长限制、设备与人力成本高、只能覆盖已搭建场景，如图 2。



图2 遥操作员通过穿戴式主端设备远程控制机器人完成抓取分拣

3.2 人类行为视频：规模化的常识来源

以头戴相机拍摄第一人称（EGO）作业视频，成本低、不占用机器人、规模化潜力最大，国内外已建成以 Ego4D（约 3000 小时）为代表的大规模公开第一人称数据集，其中蕴含丰富操作常识，适合大规模预训练，让模型先理解任务的大致过程，如图 3。但视频缺少关节角、力矩等可执行标注，且人手形态与机器人不同，需经跨形态动作重定向技术翻译为机器人动作，精细操作精度有限。



图3 第一视角头戴式多模态数据采集设备

3.3 便携采集与动作捕捉

便携手持接口采用脱离机器人本体的技术路线：由操作员手握采集装置直接在真实场景中

开展操作，采集完成后再将操作轨迹映射至不同构型的机器人，该方式采集速度快，可跨机型复用，能够较好平衡采集成本与数据质量。动作捕捉则借助可穿戴传感器、数据手套或光学系统捕获人体运动数据，采集成本低于真机遥操作，便于批量获取数据，常为人形机器人全身动作与步态采集提供支撑，但该方式同样需要完成人体到机器人的运动转换，两类设备分别如图 4 所示。



图 4 便携采集与动作捕捉两类无本体数据获取方式

3.4 自主探索与多源融合

机器人还可按预置规则或好奇心机制自行探索、试错并留存交互记录，转而训练更强的策略，如此往复形成自我增强的循环；其边际成本极低但早期效率低、噪声大，常与示教数据混用。实践中没有单一路线能独立支撑通用具身智能，行业普遍采用金字塔式的分层混合策略：底层以仿真合成与人类视频提供多样性与常识，中层以便携采集和动捕扩充真实交互，顶层以小体量高价值真机遥操作做精调纠偏。六类范式的对比见表 1。

表 1： 具身智能主要数据采集范式对比

数据范式	保真度	规模化	成本	主要用途
真机遥操作	最高，含完整力觉动作	低	最高	精细任务训练与微调
人类视频	中，缺动作力觉标注	最高	低	大规模预训练、常识注入

续表

数据范式	保真度	规模化	成本	主要用途
便携手持采集	较高，可跨机型	较高	中	中等任务规模化采集
动作捕捉穿戴	中，需动作重定向	较高	中	人形全身、步态数据
机器人自主探索	真实但噪声较大	中	低	策略自举、循环自增强
仿真合成	受仿真精度限制	理论无限、可并行	极低	长尾覆盖、预训练

四、虚拟仿真：突破数据瓶颈的关键路径

4.1 仿真的数据生产优势

仿真技术是当前唯一能以近乎零边际成本并量产数据的技术路线，被称为继理论、实验之后的第三种科研范式。其优势在于基本不存在硬件损耗与安全风险，可承受多轮试错；支持高并行计算，能够支撑成百上千个虚拟机器人在不同场景中同时开展训练；场景可控且容易复现，可支持构造罕见、危险的长尾工况；标注可自动生成，系统自动获取物体位姿、接触力与状态信息。因此，仿真也被视作支撑机器人快速迭代优化的虚拟试验场与零风险试验空间。

4.2 仿真建模的三个层次

一是本体建模，通过标准建模语言描述连杆、关节与运动范围（运动学）以及质量、惯量、摩擦、力矩（动力学），回答关节如何运动、需要多大力的问题；二是环境建模，数字化重建物体几何材质与重力、碰撞、摩擦、光照、动态要素，方法经历了物理驱动、数据驱动到混合驱动的演进；三是任务建模，即将总体目标拆解为有序的可执行单元，并约定交互规则、状态约束与成败判据；与固定流程不同，它还要同时容纳环境变化、操作顺序弹性以及机械结构本身的运动限制。

4.3 仿真数据如何规模化生产

其一为程序化生成，由算法随机改变物体位姿、数量、纹理、光照与干扰物，批量生成多样场景；其二为演示放大，仅需少量人工示范，系统即可自动适配到成百上千种几何与布局，由一条轨迹裂变出大量样本；其三为生成式的自动化数据生产流水线，由大语言模型自动提出任务、视觉生成模型自动生成物体三维模型与纹理，再在仿真中自动搭场景、生成轨迹，实现近乎无人值守的数据自动化生产。

4.4 跨越仿真到现实的鸿沟

物理引擎难以高保真还原形变、物理摩擦、传感器噪声与电机延迟，仿真中的策略迁移到真机往往表现明显退化，被称之为仿真到现实鸿沟（Sim-to-RealGap）。弥合这一鸿沟有三条主要思路。其一是域随机化：训练阶段刻意在纹理、光照等物理参数和传感器噪声上增加大幅度干扰，让策略不再依赖特定外观，并且学到对任务真正关键的不变特征，期望将现实环境视作训练时见过的众多随机情形之一，该方法最早在迁移中得到系统验证^[4]；其二是域自适应与真机微调，以少量真实数据对齐特征分布，先仿真预训练、再少量真机纠正；其三是半实物仿真，把真实控制器或机械臂接入仿真回路，由计算机运行虚拟环境、真实硬件执行并反馈，兼顾真实物理特性与虚拟环境的安全可控，是纯仿真到全真实部署之间的关键桥梁。

五、工程应用综合实训平台的虚实融合实践

上述理念在工程应用综合实训平台中得到落地。该平台围绕数据流转划分为三层：底层硬件供给示教、感知与算力，中层软件打通采集、标注、训练到推理的管线，上层应用再把这些能力编排为可落地、可评价的任务，各环节首尾衔接、形成闭环。在真机数据环节，平台采用主从协同方案：示教者操作轻便主手，经标定映射带动工业从手复现运动；腕部与顶部相机联合采集画面，系统对关节量、夹持状态、影像与时戳做同步留档，并完成数据分级和动作分段标记。平台整体形态如图 5。



图 5 工程应用综合实训平台的双机械臂实训工位整体形态

其核心特色在虚拟仿真：一方面支持借助 VR 头显与手柄在虚拟环境中遥操数字机器人，在零损耗、零碰撞风险下快速积累示教数据，并完成行为克隆、扩散策略、视觉语言动作模型等算法的仿真预训练，仿真环境中的双相机观测画面如图 6；另一方面构建三级虚实迁移闭环——先在虚拟环境预演以验证算法、量产数据、覆盖场景，再在半实物环节把策略部署到真实机械臂、于受控仿真场景中暴露动力学误差，最后在真机执行并统计成功率，真机产生的困难样本回流训练，形成持续进化的数据飞轮，配合多层可配置安全边界与一键急停保障过程安全。以视觉分拣为例，示教数据经标注后与仿真扩增数据共同构成训练集，仿真预训练、半实物验证、真机部署逐级推进，昂贵的真机时间被集中用于最有价值的验证纠偏，重复训练交由仿真承担，从而在质量、规模与成本间取得平衡。



图 6 虚拟仿真环境中的双相机观测画面（左为腕部视角、右为场景视角）

6 结语

具身智能的竞争在很大程度上从数据为源头展开。其所需的高质量多模态数据无法轻易获取，面临供需落差与不可能三角；六类采集范式多源互补，而虚拟仿真凭借低成本、高并行、可覆盖长尾、标注自动完备成为规模化生产的关键，域随机化、真机微调与半实物仿真为跨越仿真现实鸿沟提供了可行方式，虚实融合平台的实践印证了以仿真的规模优势弥补真机数据稀缺的现实可行性。未来，随着高保真物理引擎、生成式模型与世界模型发展，数据生产有望走向任务自动生成、仿真自动演示、真机少量微调的自动化链条，建立跨平台数据的标准，推动具身智能走向真实生活。

参考文献

- [1] 沈甜雨, 陶子锐, 王亚东, 等. 具身智能研究的关键问题: 自主感知、行动与进化 [J]. 自动化学报, 2025, 51(1): 43-71.
- [2] 亿欧智库. 2026 中国具身智能数据采集与数据产业发展展望 [R]. 北京: 亿欧智库, 2026.
- [3] ZhaoTZ, KumarV, LevineS, FinnC. Learning fine-grained bimanual manipulation with low-cost hardware [C] // Proceedings of Robotics: Science and Systems (RSS). 2023.
- [4] TobinJ, FongR, RayA, et al. Domain randomization for transferring deep neural networks from simulation to the real world [C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017: 23-30.

综合能源系统数字孪生：给能源系统做个“数字双胞胎”

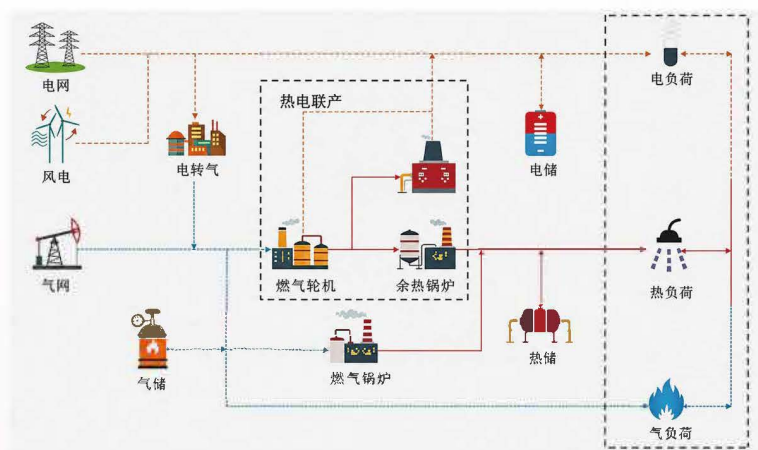
中国仿真学会综合能源系统数字孪生专业委员会

如果一台风机、一座光伏电站、一套储能系统，甚至一座城市，都能在电脑里拥有一个“数字镜像”，会发生什么？这个“数字镜像”不只是外观看起来像现实物理对象，还能跟着现实物理对象一起变化：现场数据不断更新，运行状态实时呈现，不同方案也可以在数字空间中推演比较，并将结果反馈给现实系统，为运行优化、故障预警和决策调整提供参考。这项技术叫做数字孪生。

当数字孪生走进能源领域，它面对的往往不再是单台设备，而是多种能源相互连接、转换和影响的复杂系统。综合能源系统数字孪生，就像能源系统的“数字双胞胎”，帮助人们看清运行状态、推演变化过程、优化控制策略。

一、什么是综合能源系统数字孪生？

综合能源系统是一种以电力网络为基础，把多种能源形式和相关设备连接起来的能源系统。它统筹能源的生产、传输、转换、存储和消费等环节，让不同能源相互配合，提高能源利用效率。

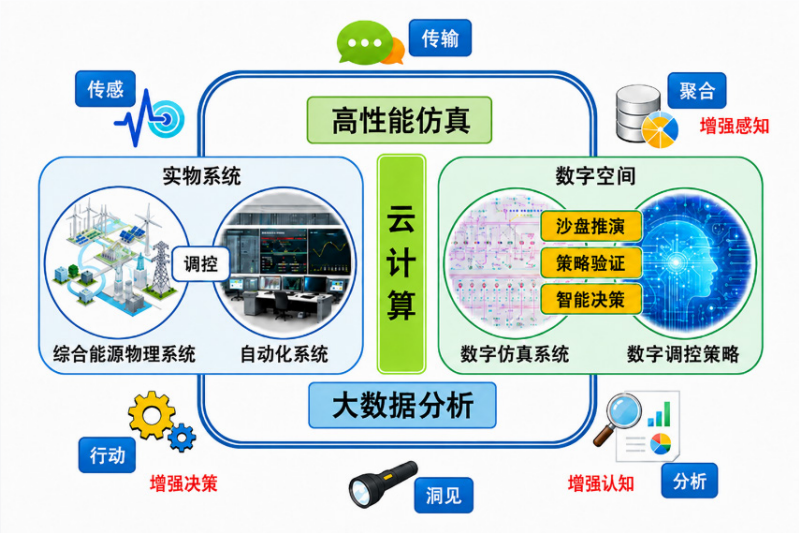


综合能源系统数字孪生是充分利用综合能源系统的物理模型、在线量测数据与历史运行数据，集成电气、热力、流体、计算机、通信、象、经济等多学科知识进行的多物理场、多时空尺度、多概率、多目标的仿真过程。通过在虚拟空间中完成对综合能源系统的映射，反映其全生命周期过程。

它不是建好后就不变的普通模型。现实系统的运行状态可以传到数字空间，数字模型随之更新；数字空间中的仿真、预测和优化结果，也可以反过来为现实系统的规划设计、运行调度和精准运维提供参考。

二、综合能源系统数字孪生的硬核科技

综合能源系统数字孪生的“硬核科技”，在于通过数据感知、模型推演和智能算法分析三个方面，使数字镜像模型逐步具备自治、同步、互动、共生等能力。



1. 状态全息感知：让虚拟空间的数字模型“看见”现实

传感器、监控系统、智能仪表等设备会持续采集现场数据。这些数据像综合能源系统数字孪生的“眼睛”和“耳朵”，让模型知道现实中发生什么。随着物联网技术发展，更多设备接入网络，实现状态感知、数据传输和远程监测，为数字空间提供数据来源，并帮助模型与现实系统同步。

2. 模型仿真推演：让数字模型“动起来”

数据告诉模型“现在怎样”，模型描述系统“如何变化”。三维建模还原外观结构，机理模型描述运行规律，高性能仿真、云计算等技术让模型持续运行、快速推演。光伏出力变化、储能充放电调整、冷热负荷波动等，都可先在数字空间比较，为设计和运维提供依据。

3. 智能分析决策：让数字模型服务现实

综合能源系统数字孪生不是一次性建好的静态模型，而是数字空间和实物系统之间的互动。它可结合大数据分析、人工智能和机器学习算法，识别规律、发现风险，并将结果反馈给现实系统，为多能协同规划设计、多能耦合优化调度等提供支持。

三、综合能源系统数字孪生的应用

1. 状态监测与故障诊断

通过接入设备运行数据，数字孪生可以实时观察光伏、储能、冷热设备、管网和电气设备的运行状态。当实际数据与模型预测结果出现明显偏差时，系统可以辅助判断设备异常、性能下降或故障风险，为精准检修提供依据。



2. 运行调度与优化控制

在日常运行中，数字孪生可以比较不同调度方案下的能源消耗、运行成本和设备状态。依托智能算法，对电、热、冷、气、储等环节进行分析，为现实系统提供更安全高效柔性灵活的运行策略。



3. 规划设计与方案选择

在综合能源系统园区建设前，数字孪生可以用于比较不同设备配置、容量选择和能源结构方案。通过提前评估投资成本、运行效率和供能可靠性，可以让规划设计更有依据。

4. 能效分析与低碳运行

数字孪生可以跟踪不同能源的流向和利用效率，帮助发现能耗偏高或运行不合理的环节。结合新能源出力和负荷变化，降低碳排放，提高可再生能源利用率。

总结：综合能源系统数字孪生不是简单的三维展示，而是利用物理模型、量测数据和历史运行数据，在数字空间中形成能够反映现实系统状态的“数字镜像”。它可以帮助人们看清多种能源之间的连接与转换关系，并通过仿真推演和结果反馈，为规划设计、运行调度、故障诊断和低碳管理提供参考。随着物联网、大数据分析、高性能仿真和人工智能等技术的发展，综合能源系统数字孪生将在提高能源利用效率、促进可再生能源消纳和支撑系统智慧运行方面发挥更大作用。

参考文献

- [1] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(02): 487-499.
- [2] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用 [J]. 全球能源互联网, 2020, 3(01): 1-13.

