04 期
2026年

FANG ZHEN TIAN DI

仿真天地

主办：中国仿真学会

- 计算仿真：架起数学方程与物理世界之间的可信桥梁
- 军事世界模型：数字孪生战场的智能推演内核
- 数字孪生机场：从全生命周期管控到未来机场试验场
- 探秘铁路货物列车工厂：在半实物仿真沙盘中了解编组站

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《计算仿真：架起数学方程与物理世界之间的可信桥梁》《军事世界模型：数字孪生战场的智能推演内核》《数字孪生机场：从全生命周期管控到未来机场试验场》《探秘铁路货物列车工厂：在半实物仿真沙盘中了解编组站》四篇文章。

”

目　录

计算仿真：架起数学方程与物理世界之间的可信桥梁
—— 中国仿真学会仿真算法专业委员会 / P1

军事世界模型：数字孪生战场的智能推演内核
—— 中国仿真学会虚拟技术及应用专业委员会 / P7

数字孪生机场：从全生命周期管控到未来机场试验场
—— 中国仿真学会虚拟技术与应用专业委员会 / P16

探秘铁路货物列车工厂：在半实物仿真沙盘中了解编组站
—— 中国仿真学会离散系统仿真专业委员会/ P25

计算仿真：架起数学方程与物理世界之间的可信桥梁

中国仿真学会仿真算法专业委员会

在设计一架飞机时，工程师不需要反复制造实体样机开展风洞试验；在研发创新药物时，科研人员不必在实验室反复试错、盲目地混合化学物质；在进行天气预报时，研究者也不再仅依靠卫星云图与经验推演。这一切的改变，都源于计算仿真。作为强大的数字模拟工具，计算仿真能够在虚拟环境中复现复杂物理演化过程，实现对真实场景的“预演”，让诸多难以观测、难以开展的实验成为可能。

计算仿真，是对真实世界的物理、化学、生物等复杂系统进行数字化重构、演化推演与规律分析的技术体系。其核心是通过科学的数学方程刻画现实问题中复杂系统的运行机理，借助计算机数值求解方法，复现系统的动态演化过程，预测不同工况下的系统响应，完成传统理论分析难以解析、物理实验难以实现的科学探究。简单来说，就是利用计算机程序，建立一个与现实系统相似的数学模型，并通过数值计算来模拟模型在各种条件下的变化，但不是对现实的完全复刻。仿真结果的精度取决于模型构建的合理性、数值算法的稳定性和收敛性以及参数设置的准确性。与现实实验相比，计算仿真不受场地、设备、环境、安全条件的限制，能够高效求解多变量、强耦合、非线性的复杂系统问题，是连接理论与实际的重要桥梁。

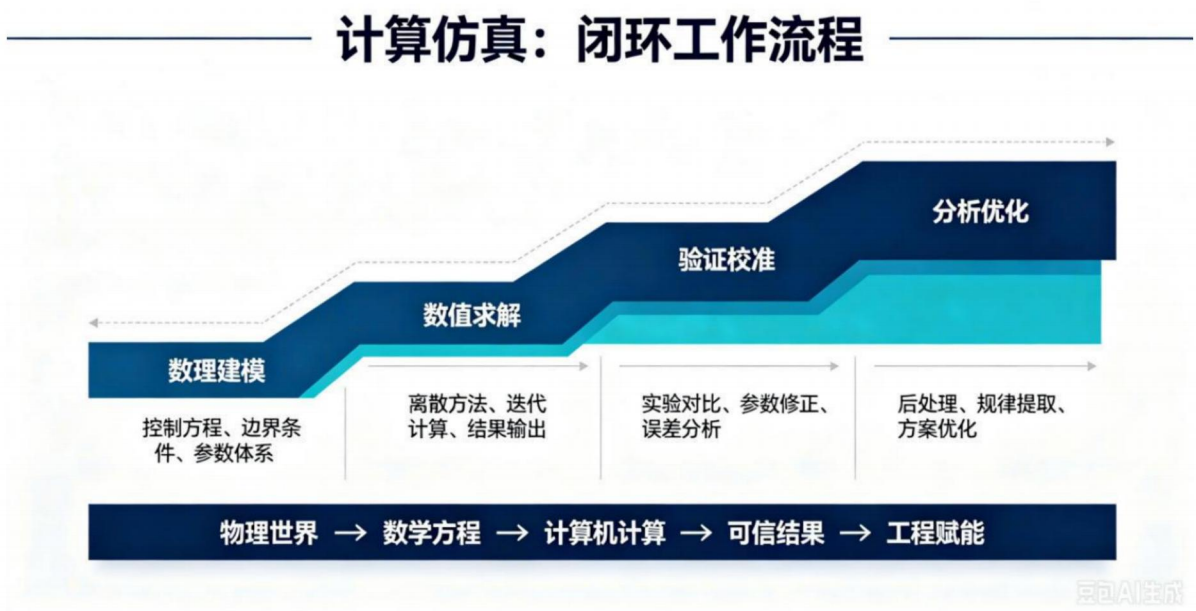
计算仿真的实际应用

经过长期技术迭代，计算仿真已广泛应用于高端制造、国防军工、民生健康、生态环境、社会经济等诸多领域。在医疗健康领域，依托数字孪生与个性化建模技术，可基于患者CT、核磁等影像数据构建高精度心脏、血管、脏器等数字化人体模型。医生可在虚拟模型上开展术前手术演练、测试不同支架与植入器械的适配效果、对比不同诊疗方案的实施差异，有效规避手术风险。全球气候模型本质是面向地球系统的巨型计算仿真体系。在气候气象与生态防灾领域，通过数值算法刻画大气、海洋、陆地、冰川多圈层的耦合作用与能量交换规律，能够精准推演短期天气变化、台风路径、极端降水等气象过程。在影视制作中，巨浪流体、烟火爆炸、特效粒子等逼真画面，均依托流体仿真、粒子动力学仿真实现，提升画面真实感与交互体验。在经济与社会科学领域，基于智能体模型（ABM）可构建海量微观虚拟主体，模拟市场交易、人群流动、资源配置等社会化行为，通过调控政策参数、环境变量，预测金融政策的宏观影响。

整体来看，计算仿真的普及应用形成了四大核心价值。一是**降本增效**，大幅减少重复实验的成本，缩短科研与工程研发周期；二是**安全可控**，规避爆炸、极端灾害、高空高速等高危实验场景的安全风险；三是**拓展科研边界**，突破时空、环境、设备的限制，实现极端工况、超长周期、复杂耦合系统的科学推演，助力人类探索未知科学规律。四是**辅助决策**，给工程、防灾、科研提供参考依据。

计算仿真的核心技术体系

计算仿真的工作过程主要分为**数理建模**、**数值求解**、**验证校准**、**后处理分析与优化**四个核心环节，各环节紧密衔接，共同保障仿真结果的科学性与实用性，其中仿真算法是决定仿真精度与效率的核心内核。



图一：计算仿真的流程

1). 数理建模

数理建模是仿真计算的首要核心步骤，本质是将现实世界的物理规律、工程问题转化为数学方程。在建模过程中，研究人员依托流体力学、固体力学、热力学、电磁学等经典基础理论，结合研究对象的实际工况、约束条件与边界状态，构建对应的方程、边界条件等信息，完成物理问题数字化抽象，是仿真的基础。不同的仿真场景对应专属的数学方程体系。比如，模拟桥梁承重、结构形变等力学问题，依托以胡克定律为核心的固体力学方程。模拟飞行器周边气流流动、水体运动等流体问题，采用纳维-斯托克斯流体力学方程。模拟电路板、动力电池的温度变化与热量传递，运用经典热传导方程。整套建模工作为后续数值计算提供了完整、规范的理论基础，是保障仿真贴合真实物理规律的前提。

2). 数值求解

数值求解是指从数学方程转向计算机计算，是仿真计算的核心。通过建模得到的偏微分方程组，大多存在多变量、强耦合、非线性特征，无解析解，无法通过常规数学方法直接求解，因此考虑数值求解。然而，计算机仅能完成基础加减乘除代数运算，为了利用计算机求解复杂的微分方程，需要考虑离散化。其核心思想为分治求解，以有限元法、有限差分法、有限体积法、谱方法等主流仿真算法为支撑，将连续的整体空间、时间域拆解为海量微小网格单元，把全局复杂的偏微分方程，拆解、近似转化为每个网格单元上简单可解的代数方程。

以飞行器流体仿真为例，技术人员会将机身周边的连续气流场，划分为数百万乃至数亿个微小网格，将复杂的气流动力学方程，在每个微小网格上近似地改写为简单的代数方程。这样一来，一个全局的复杂问题就拆解为海量基础算术问题。这个“分而治之”的过程，就是有限元分析（FEA）或计算流体动力学（CFD）的核心思想。

随后依托CPU、GPU超强算力，以超高速度反复迭代求解所有网格方程，直至计算结果收敛，最终输出全域海量数值数据，涵盖各点位的气流速度、结构应力、温度数值等核心信息，完成从数学方程到量化结果的转化。

3). 验证校准

纯数值计算所得的初始结果存在一定误差，误差主要来源于建模简化、算法截断、边界条件设置偏差等，无法直接应用于科研与工程实践。因此，验证校准是保障仿真科学性、可信度的关键环节。研究人员通过对标物理实验实测数据、工程现场监测数据、标准试验结果，逐一校验仿真计算结果，针对性修正模型参数、优化算法迭代策略、微调边界条件与约束设置，持续消除各类数值偏差，不断缩小仿真推演结果与真实物理场景的差距。若精度未达到行业标准，则返回数值求解环节重新迭代计算，通过闭环修正，最终得到贴合工程实际、具备科学参考价值的可信仿真结果。

4). 分析优化

数值求解输出的海量原始数据零散、抽象，无法直观反映系统运行规律与潜在问题，而后处理分析与优化是实现仿真赋能的最终环节。通过专业仿真后处理技术，对海量数值数据进行整合筛选、可视化渲染与深度分析，将冰冷的数字转化为直观的温度云图、应力分布云图、气流矢量图、动态演化动画等可视化效果，让复杂的物理过程、系统状态一目了然。在此基础上，通过多工况对比、规律提取、缺陷研判，精准定位设备结构短板、运行风险点、工艺不合理之处，针对性优化结构设计、运行参数、工艺方案，最终完成从单纯数值计算到工程优化、科研决策的价值转化，真正实现以仿真助力技术迭代、工程提质增效。

仿真应用实例

实验一：热传导领域的仿真应用

考虑一个典型的物理场景：一根铝杆初始处于室温环境，左端被恒定热源持续加热，右端做隔热处理，阻止热量流失。直观上，热量并不会瞬间传遍整根杆子，而是以有限的速度沿轴向逐渐推进，温度分布随时间呈现出明确的演化规律。我们希望获得金属杆上任意位置、任意时刻的温度，观察热量沿杆传播的快慢，以及温度场最终达到稳态的分布特征。如果开展实物实验，仅能在杆上少数位置布置温度传感器，获取部分离散点的数据，无法得到完整连续的温度变化信息。

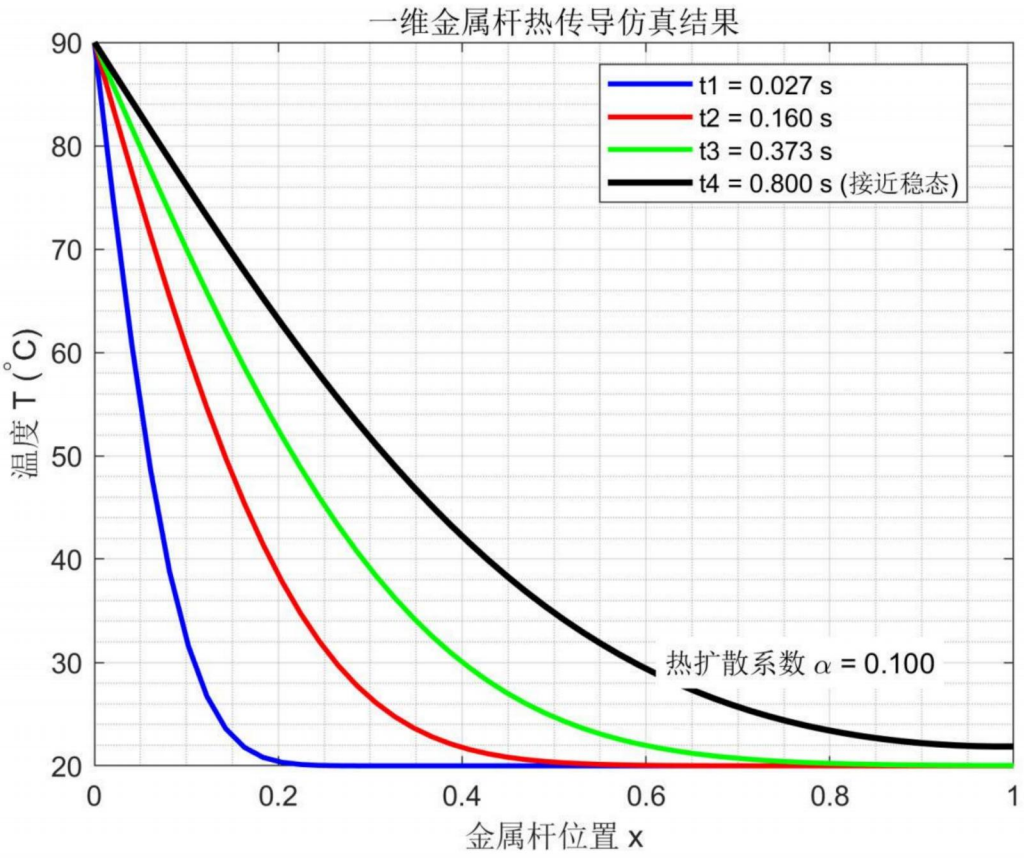
对应的数学模型由一维热方程所描述。它是热传导问题中最基础的模型。事实上，无论是芯片散热、电池热管理，还是航空航天器热控设计，很多复杂的散热仿真，内核也是这个简单方程的拓展。一维热传导方程表述为：

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2},$$

其中，$T(x,t)$ 表示位置 x 处、时刻 t 的温度，α 是铝材料的热扩散系数，为材料固有属性。该方程由傅里叶定律与能量守恒定律导出。再配上两个定解条件，即初始条件和边界条件。初始条件 $T(x,0) = T_{\text{room}}$ 代表仿真开始时刻，整根杆全部为室温。边界条件为左端温度固定为高温，右端热流为零实现隔热约束。该方程刻画了热量由高温区域向低温区域扩散的物理规律。

该偏微分方程仅在少数理想条件下存在解析解，一般情形下必须依靠数值仿真求解。首先进行空间离散，将连续的金属杆沿长度划分为一系列节点，也就是一维网格；再将时间拆分为离散的时间步。利用差商近似替代微分算子，把偏微分方程转化为简单的代数递推关系。计算机以初始室温作为计算起点，逐时间步迭代更新各个网格节点的温度，不断推进计算，直到温度场变化足够微弱，计算达到收敛。

完成求解后，仿真可以输出金属杆全部空间位置在各个时刻的温度数值。通过后处理绘制温度 位置曲线，可以直观看到热量从左端热源逐步向右扩散，靠近加热端温度更高；随着时间推移高温区域不断向右扩展，最终形成不再随时间改变的稳态温度分布。还可以选取若干仿真节点的计算结果，和实物实验的传感器测量数据进行比对，完成模型的验证校准。



图二：一维热方程数值仿真得到不同时刻铝杆上温度分布曲线

实验二：墨水扩散实验

扩散是自然界最普遍的物质输运现象。我们通过两组对照实验，观察经典扩散与分数阶反常扩散的差异。（对照组一）使用滴管吸取少量红墨水，滴入静置的清水当中，全程保持水体静止，不进行任何搅拌、晃动操作。红墨水入水后，以滴落点为中心，向四周均匀、缓慢地自主扩散。染色区域呈规整的圈层状向外晕染，整体形态近似圆形渐变光斑。扩散区域的色彩过渡连续且平滑，从中心的深红色，由内向外逐步浅化为淡红色，最终自然过渡至完全透明，无色彩断层、无局部突变、无远距离跳跃式扩散。其背后的原理是经典布朗运动主导的扩散。墨水分子持续受到周围水分子的无规则碰撞，每一次碰撞仅会让分子发生微小距离的位移。整个扩散过程中，分子始终保持小步频、短位移、持续随机偏移的运动特征，无长距离、跨越式位移行为。

（对照组二）将海绵充分浸润清水并排出多余积水，保证介质饱和含水状态。用滴管将等量红墨水精准滴至介质中心位置，全程保持装置静止。我们会观察到偶尔会有一小团红色突然出现在离中心很远的位置，像跳过去一样，有些地方颜色突然断了，有些地方突然有一丝红色伸出去很远，这种特殊现象为长程跳跃扩散。在主体扩散区域尚未延伸到的远距离位置，会突然出现零散的红色斑迹，部分墨丝、墨点跨越较远间距独立出现，完全打破了均匀渐变的扩散规律。扩散边缘极不规整，呈凹凸、破碎状，色彩分布极不均匀，存在明显的色彩断层。

其其背后的原因在于海绵属于典型的非均匀、各向异性多孔介质，内部孔隙结构复杂无序，孔隙粗细、连通性、渗透率差异极大，不存在统一的扩散通道。这种介质结构直接改变了墨水微粒的微观运动模式。在绝大多数时间里，墨水微粒被困在狭窄、闭塞的细小孔隙中，渗透阻力极大，仅能依靠微弱的分子运动缓慢偏移，对应宏观上整体扩散缓慢、主体墨色集中的特征。而当微粒偶尔连通到贯通性好、孔径粗大的优势通道时，则会在局部流体动力作用下发生快速的超前迁移，瞬间抵达远离中心的区域，形成突兀的远端墨色斑迹。这种复杂的非均质输运与反常扩散现象，无法用经典的整数阶扩散方程准确描述，而需要引入分数阶微积分（如时空分数阶扩散方程）来进行定量刻画，该理论广泛存在于土壤渗流、岩层质质、多孔材料输运等复杂介质场景中。

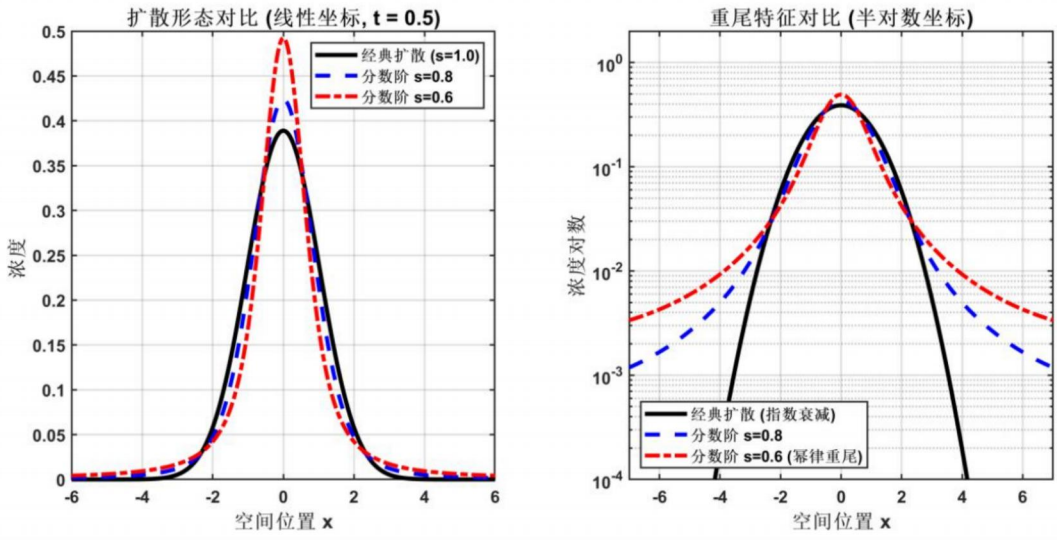
经典扩散对应的数学模型仍由前面的方程表述

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}=D\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2},$$

但数学符号的物理意义发生改变。 $T(x,t)$ 表示 t 时刻位置 x 处墨水的浓度。 D 是扩散系数。在反常扩散实验中，粒子会以一定的概率发生超越经典距离的长程跳跃，即Lévy飞行。空间中某一点的浓度演化可以直接受到远距离区域粒子的影响，这种特性称为空间的非局部性，这是二阶整数阶微分算子无法刻画的。空间分数阶扩散方程的数学模型如下：

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}+D(-\Delta)^s T(x,t)=f(x,t),\quad s\in(0,1),$$

其中， $(-\Delta)^s T$ 为Riesz分数阶拉普拉斯算子。 D 为广义扩散系数。 $s\to 1$ 时退化为经典扩散方程。 s 越小，长程跳跃效应越显著。 $f(x,t)$ 代表源汇项，无持续物质输入输出时取 $f(x,t)=0$ 。



图三：经典扩散与分数阶扩散在t = 0.5时刻的浓度演化与重尾特征对比

从左图可以看出，经典扩散（黑实线）顶部较为平缓圆润，呈现标准的钟形高斯曲线。墨水从中间向两边扩散时，中心掉得比较快。分数阶扩散随着 s 减小，中心峰值变得更加尖锐，这反映了大量粒子仍滞留在中心附近。两侧边缘，分数阶的曲线收敛速度比黑色慢。从右图可以看出，经典扩散的尾部在对数坐标下呈下凹的抛物线形状（对应高斯指数级快速衰减），这意味着粒子扩散到极远处的概率几乎为零。分数阶扩散的尾部在对数坐标下变成了一条斜率较缓的直线或平缓的拖尾（对应幂律衰减），这就是“重尾”现象。它直观体现了虽然

大部分墨水留在中心，但由于分数阶拉普拉斯算子的非局域长程跳跃，总有一部分墨水以极高的概率“飞”到了非常遥远的地方。

结论与展望

作为计算仿真的核心支撑，仿真算法的创新迭代是破解行业瓶颈的关键。未来，仿真算法与人工智能、高性能计算的深度融合，将进一步提升复杂场景仿真的精准度与效率，推动计算仿真在更多新兴领域落地应用，持续为我国科技创新、高端产业升级、重大工程建设提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 李扬波, 何朦凡, 安德宇. 人工智能技术在影视动画制作中的理论与实践研究[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2025.

[2] 中国信息通信研究院, 中国人工智能产业发展联盟, 全国智能计算标准化工作组. 科研智能：人工智能赋能工业仿真研究报告[R]. 2025.

[3] 常晓飞, 李如意, 田浩东, 等. 仿真模型实时计算技术发展综述[J]. 计算机仿真, 2026, 43(1): 38-43+67.

[4] 朱向阳, 刘明海. 温度对扩散的影响实验分析及改进[J]. 教学仪器与实验, 2008(6): 16-17.

[5] Selvadurai A P S. Poisson’s Equation[M]. Partial Differential Equations in Mechanics 2: The Biharmonic Equation, Poisson’s Equation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 503-647.

[6] Sierociuk D, Skovranek T, Macias M, et al. Diffusion process modeling by using fractional-order models[J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 257: 2-11.

[7] Bassanini P, Elcrat A R. Theory and applications of partial differential equations[M]. Springer Science & Business Media, 2013.

军事世界模型：数字孪生战场的智能推演内核

中国仿真学会虚拟技术及应用专业委员会

所谓数字孪生战场，简单说就是给真实战场造一个一模一样的数字“镜像”——照着它看清现实（以虚映实）、预判走向（以虚预实）、比出最优方案（以虚优实），甚至反过来指导真实行动（以虚控实）。四十年间，军事仿真从单打独斗的模拟器，走到联网对抗的虚拟战场，再到今天虚实融合、能反过来影响真实战场的“数字孪生战场”，已经成为现代作战仿真的前沿领域，也是军事训练和军事问题研究必不可少的基础设施。

但是，数字孪生战场在建设运行过程中，却发现了一个大问题：这座“数字战场”看得见、画得像，却无法自主驱动、自我演化。各专业的仿真模型各干各的，缺一个统一的“大脑”，只能靠人写想定、人设置条件、人发指令执行，按照事先写好的脚本“演戏”。于是，“军事世界模型”登场了——它不是单独的软件，而是嵌进数字孪生战场里的一颗“智慧大脑”。

一、研究溯源

“世界模型”这个词听着新，其实想法很老。早在1943年，心理学家克雷克就提出：人脑里装着一个“现实的小模型”，做事前先在脑子里“过一遍电影”，再决定怎么办。这个念头睡了几十年，直到生成式AI火起来才被重新捡起——2018年有人提出“世界模型”框架，2022年后的Sora又让机器“看着画面就学会世界怎么运转”。

最近两年，这类模型扎堆亮相：智源研究院的“悟界·Emu3.5”登上《自然》杂志，谷歌、Meta也接连推出新模型——练的都是同一件事：让AI不光会生成视频，还要懂物理、会预测。世界模型正从“会画画”升级到“懂世界”。

军事领域也一样，两股力量汇到一处：一股来自军事仿真自己——用大模型自动生成作战想定、给“蓝军”建模、把各种模型集成起来，都说明大家急需一个能“统揽全局”的推演大脑；另一股来自通用世界模型本身——它在物理规律、假设推演、多方博弈上的短板正被补上。两股力量合到一起，就有了“军事世界模型”：在已有的国产仿真引擎和数字孪生战场基础上，把世界模型“先在脑内预演、再讲因果道理”的本事装进去，当数字孪生战场的“大脑”，解决“看得见却推不动”的毛病。

二、概念内涵

（一）从虚拟战场到数字孪生：四十年的概念跃升

要搞懂它为什么是数字孪生战场的“大脑”，得先看看军事仿真四十年的发展脉络。



图1 军事仿真四十年六代演进路径

虚拟战场从1983年的SIMNET讲起，经过DIS、HLA、云原生仿真等几代技术，走到今天的数字孪生战场。一句话概括：起初是给人练手的单机模拟器，后来变成联网协同的大系统，再到今天用AI和云边协同把虚实打通——就像手机从“大哥大”升级到智能手机。

数字孪生战场追求四步闭环：**以虚映实**（把真实战场照进数字世界）、**以虚预实**（预判战场会怎么变）、**以虚优实**（先比出最优方案）、**以虚控实**（反过来指导真实行动）。

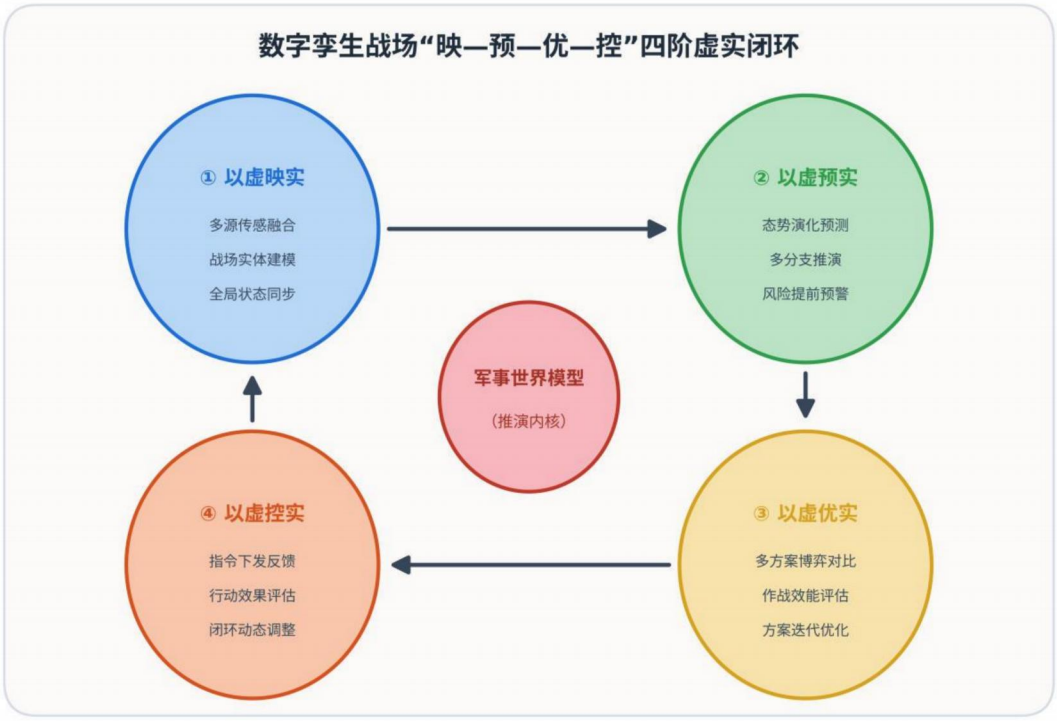


图2 数字孪生战场“映—预—优—控”四阶虚实闭环

但要把这四步跑起来，光靠传感器和画面渲染远远不够。“映实”靠传感器加建模就能做到；“预、优、控”三步，全得靠强大的推演能力撑着。缺了统一的“大脑”，各专业模型就各管一摊、只会照剧本走——这正是眼下很多数字孪生战场的通病：看得见、推不动。军事世界模型就是冲着这个痛点来的：嵌在数字孪生战场里当“大脑”，专为“预、优、控”三步提供三样硬本事——讲因果、会分支推演、能自主决策。

（二）什么是军事世界模型

军事世界模型，是拿通用世界模型的技术框架打底、专门针对战场强化的智能推演系统。它不是另起炉灶的新系统，而是“长”在数字孪生战场里面的。核心内涵记一个顺口溜——“一二三四五六”：一个底座是数字孪生战场；两个支点是讲因果、会预演；三个功能是映射现实、推演未来、反控现实；四个作用是统一时空语义、升级建模范式、自主演化博弈、校验因果逻辑；五层能力是从物理机理到可信验证；六对要义是六项能力特征加六项军事硬约束。

它的本事要一层层往上长。所谓五层能力，从下往上就是：**物理机理**、**实体行为**、**认知行为**、**群体博弈**、**可信验证**。

物理机理层管重力、弹道、毁伤、电磁、气象怎么运转；**实体行为**层给飞机、舰艇、车辆、卫星等装备建模，让它们“按自己的规矩动”；**认知行为**层给飞行员、指挥员这样的“人”建模，模拟他们怎么感知、判断、决策；**群体博弈**层给红蓝双方“斗法”建模，自动生成协同、欺骗、调动这些“群体智慧”；**可信验证**层对推演结果做“验收检查”（业内叫VV&A），把“猜的”和“算准的”分开。

这套本事有什么价值？可以概括成三句：能按真实物理规律推演，让“映实”有高保真底子；能模拟人、分队、部队的对抗，让“预实”有自主推演的本事；能“一题多想”，同时比较几套打法，为“优实、控实”提供支撑。

（三）概念辨析

三个概念容易混，放一起比一比：**传统虚拟战场仿真**是“人推着跑”，剧本、参数都由人设好，各模型照着跑，重现老场景很在行，自己演化出新战况就难了；**数字孪生战场**解决“干什么用”，它是面向指挥员的一整套业务系统，追求“映—预—优—控”四步闭环，好比一座盖好的“智慧大楼”，还缺一个“智能中枢”；**军事世界模型**就是那套“智能中枢”，负责统一推理、自主推演、生成智能行为。

一句话打比方：数字孪生战场是要盖的大楼，军事世界模型是楼里的智能中枢。没有它，数字孪生战场只能“实时看战场”，做不到真正的智能推演和决策辅助。

表1 传统仿真、数字孪生战场与军事世界模型的能力对比

能力维度	传统虚拟战场仿真	数字孪生战场（无世界模型）	数字孪生战场＋军事世界模型
核心驱动	人工编写脚本	数据驱动映射	AI内核因果推理
态势能力	复现预设场景	实时态势监控	多分支主动预判
推演方式	单路径人工推进	简单规则推演	多分支反事实推演
决策支持	提供演练环境	数据展示呈现	智能方案生成与评估



图3 有/无军事世界模型，数字孪生战场的能力跃升对比

还要分清“世界模型”和“大模型”。大模型擅长说话写文章，却爱“一本正经地胡说”，既不懂严格物理，也不会调度仿真、管理战场时空——它更像一张“嘴”。军事世界模型更像一个“脑”：调度、集成各路机理模型，在严格的物理和军事规则下推理推演，给出能验证、能解释、能执行的结论。

三、核心要义

上一节讲的五层能力，回答“本事要覆盖哪些方面”；这一节回答“这些本事得达到什么水准”。它凭什么区别于“一段好看的战场视频”？关键是要同时做到六条：六项能力特征加六项军事硬约束。下一节的五大核心模块，就是把它们做出来的“零件”。

（一）表征压缩•时空一致。特征：海量数据先“去粗取精”，把战场浓缩成只留关键信息的“提要”，让机器算得快；推演再久、分支再多，每个目标的位置、属性也得前后一致。**约束：**整场推演用同一套时间尺度和坐标，不许“瞬移”“属性突变”“时间错位”。

（二）前向预测•内部仿真。特征：根据“当前态势＋我方怎么动＋对方可能怎么应”，在“脑内”推演出往后若干步的变化，给出几条分支，还能回答“如果当初……会怎么样”。**约束：**推演要快，分支互不干扰、随时能倒回去看。

（三）物理常识•因果守序。特征：把重力、碰撞、弹道、毁伤、电磁、气象这些物理规律内化成“硬条件”，保证结果说得通；还要分清“先后”和“因果”——时间上先后，不等于一个是另一个的原因。**约束：**因在前、果在后，不许因果颠倒；战况必须符合物理规律和装备真实参数。

（四）可解可干·人机协同。特征：结论要说得出“为什么”；指挥员随时能叫停、改条件、换分支，人始终在指挥链上。**约束：**关键环节允许人工纠偏，重要结论由人拍板。记住：智能推演是帮人判断得更好，不是替人做决定。

（五）规则校验·可控生成。特征：生成的新战况、新方案，必须落在作战规则、部队编制、条令条例允许的范围内。**约束：**严禁凭空捏造不存在的部队、超规格的装备；大模型吐出的内容必须先过一道“规则检查”。

（六）鲁棒可信·全程校验。特征：数据缺了、传感器有噪、对手又在放“烟雾弹”时，模型也得稳稳给出结果。**约束：**从数据、模型、推演到应用，每个环节都要有“可信度检查”，关键结论标上可信程度。

四、五大模块

前面讲了“该有什么”（五层能力）和“要达到什么水准”（六对要义），这一节回答“靠什么做出来”。军事世界模型由五个核心模块协同干活，像大脑的不同功能区——分工明确，又紧密配合。

模块一：统一时空基准模块。系统的“统一时钟和坐标系”。它管好每个目标的时刻和方位，保证各层数据时间对齐、空间对得上号。

模块二：事件驱动调度模块。系统的“心脏和节拍器”。它盯着战场上发生的每件事，按轻重缓急统一调度各种模型协同运行，撑起大规模并行推演。

模块三：军事语义中介模块。系统的“翻译官”。它把传感数据、仿真数据、条令文本、口语指令“翻译”成统一的军事语义，让指挥员用大白话就能和系统对话。

模块四：状态冲突仲裁模块。系统的“裁判员”。几个模型对同一目标给出打架结论时，它依据规则和可信度“判案子”，保证全局状态一致；还负责把大模型“胡说八道”的部分拦下来。

模块五：因果分支推演模块。系统的“思考区、预见区”。它根据当前态势自动铺开几条行动路线，一条条推演、比较优劣，专门回答“如果我这么打，战局会怎样”。是“以虚预实、以虚优实”的当家模块。

五、系统架构

先说清楚：下面讲的六层架构，是数字孪生战场的整体架构，不是军事世界模型自己的一套。军事世界模型像零件一样嵌在这座六层大楼里，住在L5层（智能推演层），由前面五个核心模块组成，是驱动整座战场从“看得见”走向“推得动”的“大脑”。

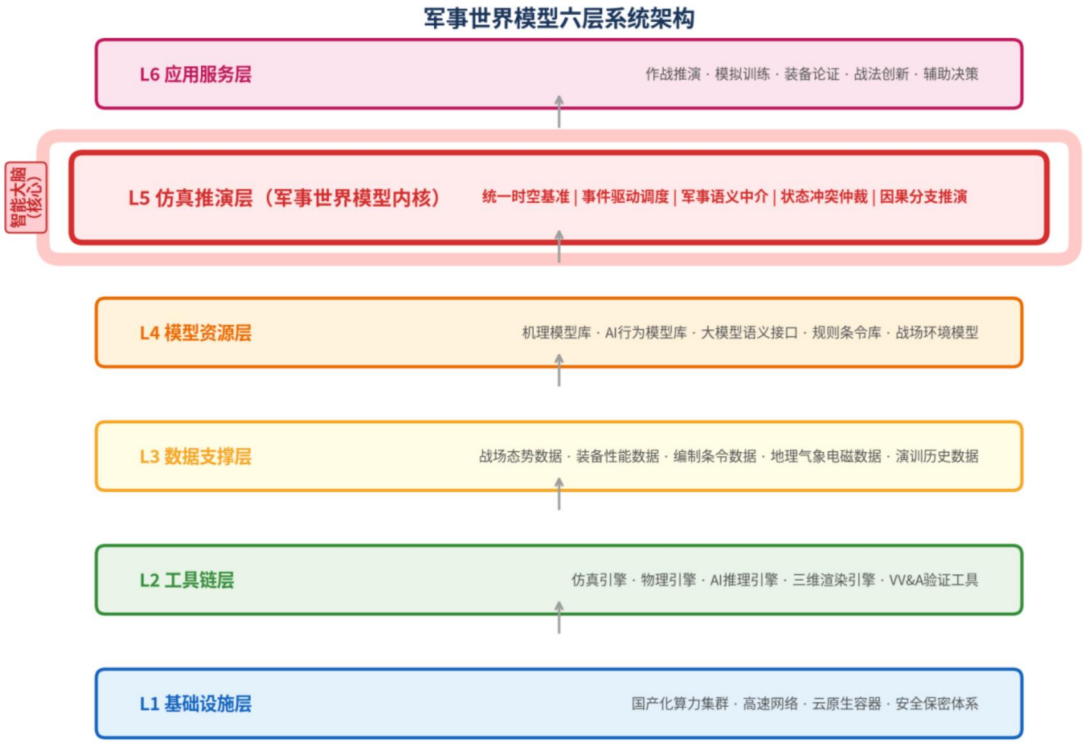


图4 数字孪生战场六层系统架构（红色高亮L5为内嵌的军事世界模型内核）

从下往上：**L1物理现实层**是真实世界的兵力、装备、环境和传感器；**L2数据资源层**是“数据仓库”，把传感数据、装备参数、地理环境、知识图谱、条令规则收拢洗净、标好注；**L3模型资源层**是“专业模型库”，地形、气象、电磁、弹道、毁伤、机动、通信等机理模型都在这里，是L5随用随取的“零件箱”；**L4仿真引擎层**是国产化的“运行环境”，管时间推进、事件调度、互联、渲染，是整座战场的“底盘”；**L5智能推演层**是六层里唯一由军事世界模型占据的一层；**L6应用服务层**面向训练教学、装备论证、联勤保障等场景，服务指挥员、教员、科研人员。

这套架构的设计思路，可以概括成十二个字：内核集中、资源开放、应用灵活。核心能力只建一套，各家不用重复“造脑子”，各业务又能按需伸展手脚——这正是军事世界模型嵌进数字孪生战场的落地之道。

六、工程实施

建军事世界模型是个大工程，不可能一天建成。结合国内基础和国产仿真技术积累，我们提出“六步走”——**定界、立架、筑基、造脑、合体、运行**。要记住：“数据底座”和“可信评估（VV&A）”两件事，**从头贯穿到尾**。

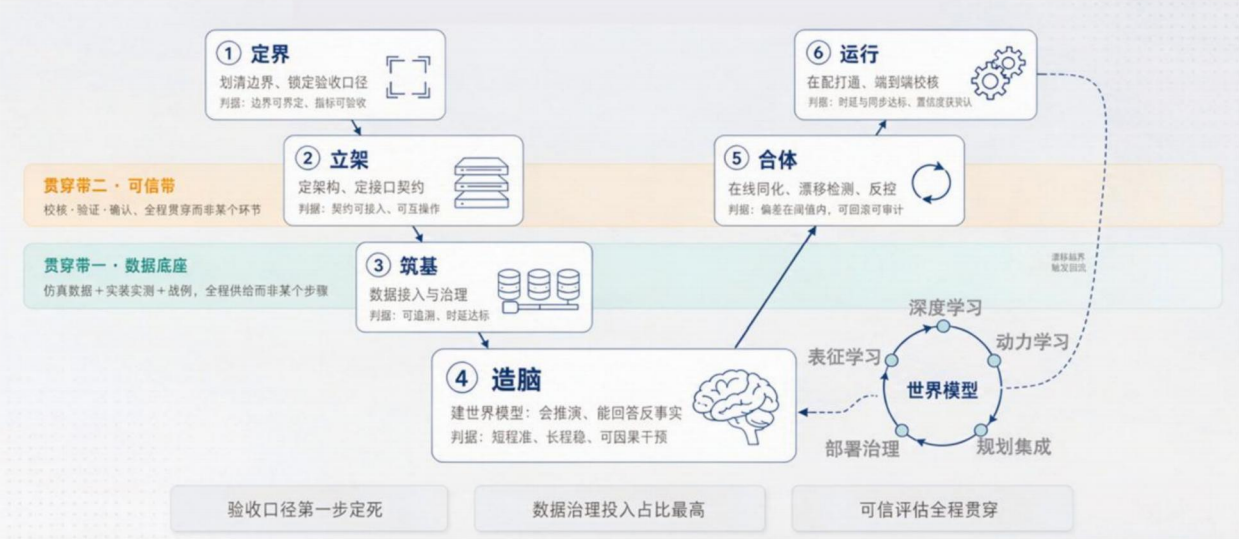


图5 军事世界模型工程实施六步法

第一步，需求定界。别一上来就想做“万能模型”，先想清楚服务哪个场景——联合推演？飞行训练？装备论证？还是联勤保障？据此划定能力范围，明确“做什么、不做什么”。

第二步，架构立架。按六层架构把蓝图定下来：每层有哪些模块、接口怎么定、走哪条路线。尤其要想清楚：L5这颗“大脑”怎么跟已有的数字孪生战场接上——是嵌入改造，还是并排新建？

第三步，数据筑基。“数据是AI的粮食”。把各种战场数据收拢、清洗、标注，搭起“数据底座”，同时建好知识图谱和规则条令库。这活儿得长期积累、不停更新。

第四步，内核造脑。这是整个工程的核心——把五个模块开发并集成好：先做“统一时空基准”“事件调度”两个基础模块，再搭“语义中介”“状态仲裁”，最后攻关“因果分支推演”；同时把物理规律、军事规则“浇注”进模型，保证结果可信、可控。

第五步，系统合体。把“大脑”和原有系统接到一起联调：连通L1—L4的数据和模型接口，做多模型联动测试；再跟L6应用对接，在典型场景里从头到尾跑一遍。主要解决“接口对不对得上”“性能跟不跟得上”。

第六步，运行迭代。通过可信评估后，先在试点单位用起来，在使用中收集反馈，不断打磨准确度和推演速度，形成“建设—应用—评估—改进”的闭环。军事世界模型没有“终极版”，只能在用中进化。

再强调一遍：“数据底座”和“可信评估”必须贯穿六步从头到尾。数据质量决定模型能走多高，可信度决定用户敢不敢用。

七、典型应用

这颗“大脑”已经在训练教学、装备论证、联勤保障等方向用起来了。三个例子各展一手：训练教学验证“不用脚本、自己就能对抗”；装备论证验证“假设推演 + 效能评估”；联勤保障验证“跨域连锁推演、提前预判”。

图7 军事世界模型三大典型应用场景示意



图6 三大典型应用案例总览（训—研—保）

案例一：三维数字教员飞行教学系统（训练教学方向）。这套系统用在航空兵飞行训练上，把军事世界模型装进了飞行模拟的数字孪生环境。它有三个突破：**一是有了会打战术的“AI教员”**——能根据学员操作实时摆出对抗态势，不再“照着脚本飞”；**二是能当场纠错**——学员做着动作，教员就能指出偏差、讲解要领；三是全过程打分——对每个决定量化评估，给出改进建议。

案例二：装备体系论证与作战效能评估智能推演系统（装备论证方向）。这套系统用在新型武器装备的立项论证、作战使用和体系贡献度评估上。过去论证有个老大难：造样机周期长、花钱多，体系对抗很难真刀真枪验证，“如果……会怎样”更没法做实验；而且传统做法往往盯着“单件装备的射程、精度、威力”单算，可现代战争打的是体系，单件再强也不一定变成整体战斗力。

第一，多套方案一起比。同一个任务同时放上好几型候选装备，靠分支推演自动跑完上千场虚拟对抗，比出哪套突防概率高、毁伤效率好、生存能力强。**第二，把“体系贡献”算得清。**把传感、通信、指挥、火力、防护这些跨域模型放进同一框架，算出新装备让“观察—判断—决策—行动”（OODA）循环快了多少、火力链闭合时间短了多少，回答“整体强了多少”。**第三，假设极端情况，试出装备边界。**高原山地、强电磁干扰、卫星被压制、节点被摧毁这些难实装试验的“冷门场景”，可在虚拟空间成批构造，提前暴露论证盲区。全程还有状态仲裁模块拦下“参数超标”之类的胡话，结果过一遍可信校验。

案例三：战场全域物资投送与智能抢修系统（联勤保障方向）。这套系统用在联勤保障的数字孪生战场上，解决过去“运输、仓储、抢修各算各的”老毛病。统一时空基准和事件调度模块，把投送路线、物资仓储、战场抢修这些各管一摊的模型拉进同一个推演框架，实现**跨域连锁推演**——比如某阵地遭袭，系统会自动推演毁伤多严重、预判缺什么物资、规划最快的投送路线、就近调集抢修力量。分支推演还能同时铺开几套保障方案比效能，实现**“从被动响应到主动预判”**。

三个案例都指向同一个结论：**没有军事世界模型当大脑，各专业模型只能各按各的规则跑，生不出跨域协同的智能行为；有了它，统一调度、讲因果，数字孪生战场才真正“活”过来**——从“看得见态势”升级为“推得动演化、判得准趋势、优得了方案”。

八、发展展望

军事世界模型这颗“大脑”不会一夜长成，得一步步迭代打磨。往后看，有四个方向值得关注。

1. 从单一领域走向跨域融合。如今它在空战、海战等单一兵种场景已有初步验证，下一步要把陆、海、空、天、电、网的模型打通，支撑联合作战层面的跨域推演。

2. 从离线训练走向在线学习。结合真实演训数据和实战反馈，实现“越用越学、越学越准”的自我迭代。

3. 从“模型说了算”走向“人在回路”。强化“讲得清”“能插手”的能力，让指挥员看得懂、管得住、用得顺，形成人机搭档。

4. 从专用系统走向标准生态。推动接口规范、模型格式、评估标准统一，形成开放的国产模型生态，免得各家各建、彼此不通。

可以预见，随着通用世界模型技术不断进步、军事仿真应用不断深入，军事世界模型将成为数字孪生战场的“标配大脑”，推动军事仿真从“人驱动仿真”迈入“智能大脑驱动推演”的新阶段。

参考文献

[1] Craik K J W. The Nature of Explanation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1943.

[2] Ha D, Schmidhuber J. World Models[C]//Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2018. arXiv:1803.10122.

[3] 北京智源人工智能研究院. 悟界Emu3.5多模态世界大模型[R]. 北京: 北京智源人工智能研究院, 2025.

[4] Gemini Team, Google DeepMind. Gemini 2.5: Pushing the Frontier with Advanced Reasoning, Multimodality, Long Context, and Next Generation Agentic Capabilities[R]. arXiv:2507.06261, 2025.

[5] Assran M, Bardes A, Fan D, et al. V-JEPA 2: Self-Supervised Video Models Enable Understanding, Prediction and Planning[R]. arXiv:2506.09985, 2025.

[6] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.

[7] 董志明, 胡忠奇, 赵赵阳, 周贺阳. 作战仿真想定智能化生成研究综述[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1665-1683.

[8] 刘权, 王宇, 刘林越, 等. 基于知识闭环驱动的智能化博弈对抗推演研究[J]. 系统仿真学报, 2026, 38(2): 416-432.

[9] 王秉珩, 刘庭瑞, 杨帆, 等. 仿真可信度智能评估需求及方法研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(7): 1710-1722.

数字孪生机场

——从全生命周期管控到未来机场试验场

中国仿真学会虚拟技术与应用专业委员会

从航站楼门口走到登机口，平均要多久？行李从托运到装上飞机经过了哪些环节？大雾、暴雨、大风等极端天气下，多大的航班量是安全运行的上限？新修一条跑道或航站楼，真能让机场容量翻倍吗？这些问题，过去靠经验、靠表格、靠事后复盘；今天，越来越多的机场正在数字世界里再造一个“自己”，用它提前做规划、实时做调度、出事先推演。这个“自己”，就是数字孪生机场。

一、什么是数字孪生机场

所谓数字孪生机场，简单说，就是在数字空间里为实体机场建造一个“全息镜像”——它不仅长得和真实机场一模一样（航站楼、跑道、滑行道、机坪、管线、设备一应俱全），而且能实时“感知”真实机场里发生的一切（飞机在哪、人在哪、行李在哪、设备在哪、天气怎样），能在数字空间里“跑”出未来各种可能（如果下一小时下暴雨、如果某条跑道临时关闭、如果突发火情），最终把最优的决策“反哺”给真实机场。它的核心不是“看起来像”，而是“算得准、管得住、能预判、可干预”——能推演、能诊断、能优化，甚至在授权范围内自动下发控制指令。

它和许多机场已有的三维可视化大屏不是一回事。三维大屏解决的是“看得见”，把现场搬到屏幕上；数字孪生解决的是“算得清、管得住、能预判”，在看得见的基础上进一步仿真推演和智能决策。两者的差别，就像一张城市地图与一座能跑交通仿真、能预测拥堵、能调度红绿灯的“数字城市”之间的差距。

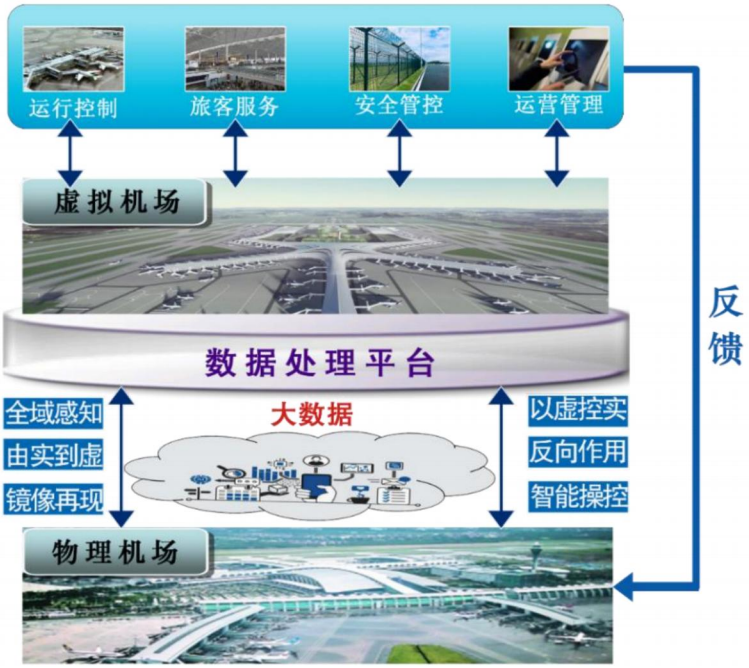


图1 数字孪生机场：物理实体与数字镜像的双向映射

（图中左侧为物理机场，右侧为数字镜像，双向箭头分别表示“实时感知·数据映射”与“智能决策·反向控制”）

二、贯穿机场全生命周期

机场是一个典型的复杂巨系统：航站楼动辄几十万平方米，机位、廊桥、值机、安检、行李、机坪、塔台、油料、机务、地服环环相扣，任何一个环节的拥堵或故障都会像多米诺骨牌一样传导到下一个环节。数字孪生最大的价值，就在于它能“管到底”——从规划设计、施工建设，到投入运行、日常运营、管理决策，再到安全保障、应急演练，贯穿机场的整个生命周期。



图2 数字孪生机场贯穿机场全生命周期

（规划设计—施工建设—验收联调—日常运营—管理决策—安全保障—应急演练，七个阶段贯穿一条数据主线）

1. 规划建设：先在数字世界里“造”一遍

过去建机场，规划方案画在图上、做在沙盘里，真要看出问题，往往是楼盖好了、路铺好了、人流不畅了、机位摆不开了才发现，改起来成本极高。数字孪生的第一重作用，就是“先试后建”。在规划阶段，可以把跑道走向、机位数量、廊桥位置、航站楼内值机柜台和安检通道布局、陆侧道路的车流走向全部放进孪生模型，模拟不同航班量、不同旅客结构下的运行情况：旅客从值机到登机要走多久？高峰时段安检排多长队？远机位摆渡车堵在哪？货机区和客机区会不会交叉干扰？用仿真结果反向调整规划方案，把问题消灭在图纸阶段。

在施工阶段，数字孪生把设计模型与施工进度关联起来，实现“虚拟建造”：可以提前做管线碰撞检查、吊装作业模拟、施工工序推演，发现设计图纸里的“打架”问题，减少返工。北京大兴国际机场的BIM模型涵盖7个专业，在施工阶段消除了大量管线碰撞问题；广州白云机场T3航站楼以3400余个全要素BIM模型、1700多万个构件施工，通过孪生仿真提前发现并解决了上百处施工冲突，节约工程成本3000余万元。

2. 运行运营：让每一架飞机、每一辆车、每一件行李都“看得见、调得动”

机场投运之后，每天要处理几百甚至上千架次航班、几万名旅客、几万件行李，机位分配、廊桥调度、地服车辆（摆渡车、加油车、牵引车、货运车、除冰车、清洁车等）的排班与路径，以往很多靠值班员经验排、靠对讲机协调，一遇到天气、流量控制或飞机晚点，就容易出现“车在等飞机、飞机在等车、人在等行李”的混乱局面。

数字孪生平台把飞机、车辆、人员、行李、设备实时接入孪生场景，结合在线仿真引擎，可以对未来几十分钟到几小时的运行态势做滚动预测：哪个机位即将空闲、哪架飞机会晚点、哪辆保障车下一个任务去哪最优——系统能自动给出调度建议，甚至在授权范围内直接下发指令。鄂州花湖机场的“丰隽云镜”平台已经实现了100%全货机停机位自动分配、92%的运输任务自动指派、100%的保障车辆动态排班，航班分配工作耗时压缩90%以上，车辆每日调度距离减少40%，总体运行时效提升约5%， 累计为机场节约投入成本超过1亿元，入选国家数据局首批50个数字中国建设典型案例。

3. 管理决策：让“拍脑袋”变成“看数据”

机场日常管理中有大量需要“评估”的事：明年航班量增加10%，现有保障能力能不能兜住？新开通一条国际航线，应该配多少值机柜台、多少廊桥、多少地服人员？一次雷暴天气过后，航班积压多久能清完？设备什么时候该维护？这些问题以往靠经验估算，数字孪生给出了另一种答案：把方案放进孪生模型里跑一遍，结果一目了然。

在容量评估上，可以利用孪生模型模拟不同天气、不同航班结构下机场的实际保障能力，得出跑道小时容量、机坪容量、航站楼容量的“真实值”，而不是简单的设计值；在设备管理上，通过设备实时运行数据接入孪生体，可以对电梯、扶梯、行李分拣系统、登机桥、助航灯光等关键设备做故障预测，把“坏了再修”变成“快坏的时候提前保养”；在投资评估上，改扩建之前先在孪生体里模拟投入后的效果，算清“花这笔钱到底能提升多少容量、缩短多少旅客时间、降低多少延误率”。

4. 应急演练：在数字世界里“真刀真枪”练

机场最怕突发事件：飞机冲出跑道、航站楼火情、旅客突发疾病、非法干扰、极端天气……这些场景在真实世界里无法反复演练，真出事一次代价巨大。数字孪生提供了一个“零风险演练场”——可以在孪生场景里还原真实突发事件，让指挥人员、地勤、消防、医护、公安在虚拟环境里完成一次完整处置，系统记录每一步的反应时间、处置路径、资源调度，事后复盘哪里快了、哪里慢了、哪里堵了。

不仅是“练”，更可以“用”：发生突发情况时，孪生平台能实时计算最优疏散路线、最优消防车辆路径、最优资源调配方案，并在三维场景里直接“画”给指挥员看；能预测几分钟后旅客会涌向哪个出口、火势会向哪个方向蔓延，给指挥员留出提前量。首都机场、广州机场的数字孪生平台都已嵌入应急演练与应急指挥模块，能对航空器地面冲突、车辆飞机碰撞、航站楼疏散等典型场景做沉浸式推演。



图3 飞机起火特情应急处置演练仿真场景示意

三、数字孪生机场是怎么建起来的

一个能真正“跑起来”的数字孪生机场，不是买套软件、把三维模型贴上去就能建成的。按照行业通行的建设路径，大致分四步走，每一步都要“建一点、接一点、跑一点、验一点”，避免“先建完模型再找应用”的建运脱节。

1. 建“数字地基”：高精度数字化模型

这一步的目标，是给机场在数字世界里铺好“底图”。一般分两层做：先建平面模型，再建三维模型。平面模型里，地面设施要把跑道、滑行道、停机坪、航站楼、陆侧道路、地下管线（给水、排水、电力、通信、航油等管点管段）、机场终端区空域、净空保护区等一一数字化，精确到道面等级、PCN值、跑道长度/宽度/坡度、滑行道分类、助航灯光位置；三维模型则通过激光扫描、倾斜摄影、BIM参数化建模、全息建模等多种方法，把地面建筑、地下管线、净空障碍物和特殊效果（云层、雨雪、灯光、火焰、烟雾）还原出来。机场模型的精度通常要求达到厘米级，才能支撑后续仿真和调度。

2. 搭“神经网络”：采集真实数据并与模型关联

光有静态模型，孪生体只是一个精致的“沙盘”。第二步是给模型接上“神经末梢”，把飞机（航班动态、ADS-B/雷达）、车辆（GPS/北斗、RFID）、人员（蓝牙、UWB定位）、行李（RFID条码）、设备（传感器、SCADA）、气象（风、温、雨、能见度）等多元异构数据实时采集进来，按统一时空基准把数据“挂”到模型的对应构件上——也就是让每一段跑道、每一个机位、每一辆车、每一件设备在数字世界里都有对应的“身份卡”和实时状态。数据底座要解决“通不通、准不准、全不全”三个问题，才能让后面的仿真可信。

3. 装“预测大脑”：开发故障预测与智能分析模型

这一步是让孪生体从“看得见”走向“算得清”。基于接入的历史数据和实时数据，针对关键设施设备（登机桥、行李分拣系统、电梯扶梯、助航灯光、加油设备、信息系统等）开发故障预测模型——用统计方法、机器学习、深度学习等手段建立“正常运行基线”，一旦实时数据偏离基线，系统提前预警，把“坏了再修”变成“快坏就保养”。这一层还包括旅客流、车流、航班流的预测模型，为后续调度和仿真提供预测输入。

4. 配“沙盘引擎”：开发全要素全流程仿真系统

仿真引擎是孪生机场的“灵魂”。按照机场业务域，一般要分别建设空侧仿真（跑道、滑行道、机位、塔台管制、地面滑行）、航站楼仿真（值机、安检、候机、商业、旅客流线）、陆侧仿真（停车场、捷运、周边路网、综合交通）三套子系统；再进一步把它们打通为统一的在线仿真系统，采用持续瞬态仿真等方法，融合实时数据实现分钟级滚动预测。只有仿真引擎能跑起来，前面几步建的模型和数据才真正“活”起来，才能支撑规划评估、调度优化、应急推演。

完成这四步之后，还要持续做“模型校准”和“闭环验证”——用真实运行结果反过来校正模型参数，让孪生体越跑越准，形成“由实入虚、由虚控实”的长期迭代机制。这也是为什么真正的数字孪生不是“交钥匙工程”，而是一项与机场同生命周期的持续工作。

四、当前发展状况

政策层面，数字孪生机场已经从“可选项目”变成“明确方向”。民航局先后印发《推进四型机场建设行动纲要（2020—2035年）》（2020年）、《智慧民航建设路线图》（民航发〔2022〕1号，2022年）、《关于推动“人工智能+民航”高质量发展的实施意见》（民航发〔2025〕24号，2025年11月），都把数字孪生列为关键支撑技术。国家标准层面，《信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求》（GB/T 43441.1—2023）已于2023年发布实施；《信息技术 数字孪生 第2部分：数字实体实体》（GB/T 43441.2—2026）、《信息技术 数字孪生 第3部分：信息交互》（GB/T 43441.3—2026）两项国家标准已于2026年1月28日发布、2026年8月1日起正式实施，对数字实体构成和信息交互流程给出了统一规范，正在推动不同厂商、不同机场之间从“各建各的”走向互联互通。国际标准方面，IEEE 3144—2025《IEEE Standard for Industrial Digital Twin Maturity Model and Assessment Methodology in Industry》于2025年9月发布，首次给出了工业数字孪生成熟度分级与评价方法。

实践层面，国内一批机场已经做出了有代表性的探索：

表1 国内典型数字孪生机场实践一览

机场	代表场景	关键成效	所处阶段
鄂州花湖机场	停机位分配、车辆调度、分拣中心与陆侧交通联动	100%全货机停机位自动分配、92%运输任务自动指派、100%保障车辆排班；航班分配耗时压缩90%以上，车辆日调度距离减少40%，节约投入超1亿元	L3~L4 在线仿真+智能调度
北京首都机场	飞行区/航站区/公共区全区域态势一张图、应急指挥	民用机场数字孪生建设与应用案例入选交通运输部2025年度数智交通推荐技术汇编	L3~L4 区域联动+智能决策
广州白云机场T3	施工阶段BIM协同、改扩建规划评估	3400余个全要素BIM模型、1700多万构件，提前发现并解决上百处施工冲突，节约工程成本3000余万元，获buildingSMART openBIM国际大奖	L2~L3 施工+早期运营
北京大兴机场	7专业BIM设计施工协同	施工阶段消除大量管线碰撞问题，成为四型机场标杆	L2~L3 设计施工数字孪生

但也要清醒看到，绝大多数机场的数字孪生还停留在L1~L2“好看的大屏”阶段——三维模型建起来了，实时数据接进来了，但“真能算、真能管、真能决策”的闭环还没有完全打通。不同系统的数据标准不统一、建运两张皮、重展示轻应用、仿真可信度不足、算力与实时性难兼顾、懂业务又懂技术的复合型人才短缺，仍是行业普遍存在的短板。两项国家标准的实施，有望从“实体怎么建”“信息怎么交互”两个底层维度缓解这些问题。

五、未来展望：与大模型、世界模型共进化

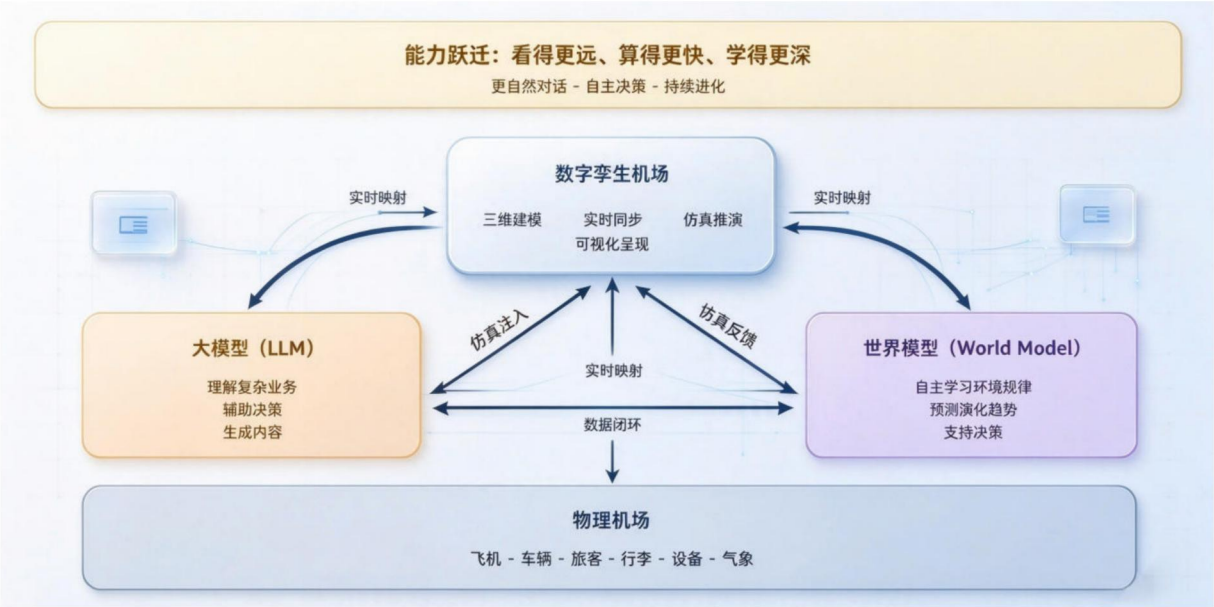


图4 大模型与世界模型驱动的未来数字孪生机场架构

1. 大模型让孪生机场“能听懂、能思考、能对话”。过去和数字孪生打交道，需要专业人员点菜单、输参数、查结果。未来接入民航大模型后，指挥员、运维人员甚至旅客都可以用自然语言和孪生机场对话：“今天CA1234落地后靠哪个机位最快？”“三号航站楼安检现在排队多少人？”“如果今晚22点雷暴覆盖机场，明天早上能消化完积压航班吗？”——大模型会理解问题、自动调用仿真引擎跑完推演，再用自然语言把结论、原因、建议方案讲给人听。大模型还能从机场几十年的运行日志中沉淀经验，把老师傅脑子里“只可意会”的判断转化为模型可以调用的知识。

2. 世界模型让孪生机场“真正学会预见未来”。今天的数字孪生主要靠设定好的仿真规则推演，而正在快速发展的“世界模型”会让孪生体拥有更接近真实世界的预见力。世界模型是一种能从大量历史数据中自主学习物理规律和运行规律的人工智能模型，它不只是按公式跑计算，而是能像人一样理解“如果发生A，大概率会导致B”。接入世界模型后，孪生机场对极端天气、突发事件、大面积延误、设备故障连锁反应的预测会更准、更远，能回答“假如发生从未发生过的情况，会怎样”这类以前仿真回答不了的问题。

3. 算力提升让“全域孪生、实时孪生”成为可能。今天数字孪生的瓶颈之一，是“算不过来”——一个机场的全要素模型动辄几千万个构件，要做到秒级实时更新、分钟级仿真推演，对计算能力要求极高。随着GPU/AI算力持续升级、云边端协同计算、5G-A/6G大带宽低时延网络的普及，未来的孪生机场可以做到：机场全域（航站楼、飞行区、货运区、陆侧交通、周边空域、甚至连接机场的高铁、地铁、高速）都放进同一个孪生体里，所有对象的位置、状态做到秒级甚至毫秒级同步；WebGPU、轻量化渲染让指挥大厅、平板、手机都能实时查看孪生画面；仿真速度比真实时间快数倍甚至数十倍，真正具备“提前量”。

4. 成为“未来机场”的试验场。未来的机场会变成什么样？无人驾驶的地服车、全自动的行李分拣、机器人安检、无人机巡检、无人值守的设备机房、空天地一体的出行服务、零碳能源运行……这些新概念、新技术能不能真用、用在哪里、用上之后会带来什么新问题，在真实机场直接试风险太大。数字孪生机场恰恰提供了一个“未来机场试验场”——任何新技术、新流程、新构型，都可以先在孪生体里跑几个月甚至几年， 把“如果真的这样运行，会发生什么”看清楚，再决定要不要落地、怎么落地，把试错成本降到最低。



图5 数字孪生机场作为“未来机场试验场”

5. 最终走向自主孪生、闭环自治。更远的未来，数字孪生机场会沿着L1可视化（看得见）→L2可联动（数据通）→L3可推演（算得清）→L4可决策（管得住）→L5可自治（自己跑）的五级路径持续演进，从“辅助人决策”进化到“在授权范围内自主决策”——系统自己感知态势、自己推演方案、自己下发调度指令、自己评估执行效果、自己优化模型参数，形成“由实入虚、由虚控实”的自主闭环。人不再需要盯着屏幕、排机位、调车辆、催保障，而是把精力放在处理真正异常、真正需要人判断的少数情况上。到那时，数字孪生就不只是机场的“镜子”和“沙盘”，而是机场运行不可分割的“数字大脑”。



图6 数字孪生机场五级演进：从“看得见”到“自己跑”

结语

从三维可视化大屏到能推演、能调度、能预判的真正孪生，从辅助工具到未来机场的试验场和数字大脑，数字孪生正在重新定义机场的建设方式、运行方式和管理方式。这条路才刚刚开始——模型要更准、数据要更通、算法要更聪明、标准要更统一，但方向已经很清楚：未来的每一座机场，都将同时存在于物理世界和数字世界之中，两个“机场”相互映射、相互优化，让飞机飞得更准、旅客走得更顺、机场跑得更安全、更高效、更智慧。

参考文献

[1] 中国民用航空局. 关于印发《中国民航四型机场建设行动纲要（2020—2035年）》的通知[Z]. 民航发〔2020〕1号, 2020-01-03.

[2] 中国民用航空局. 关于印发《智慧民航建设路线图》的通知[Z]. 民航发〔2022〕1号, 2022-01-06.

[3] 中国民用航空局. 关于印发《关于推动“人工智能+民航”高质量发展的实施意见》的通知[Z]. 民航发〔2025〕24号, 2025-11-19.

[4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 43441.1—2023 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 43441.2—2026 信息技术 数字孪生 第2部分：数字实体[S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

[6] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 43441.3—2026 信息技术 数字孪生 第3部分：信息交互[S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

[7] IEEE Standards Association. IEEE Std 3144—2025 IEEE Standard for Digital Twin Maturity Model and Assessment Methodology in Industry[S]. New York: IEEE, 2025.

[8] 格里夫斯 M. 智能制造之虚拟完美模型：驱动创新与精益产品[M]. 方志刚, 张振宇, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[9] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu: AIAA, 2012: 1-14.

[10] 庞国锋. 智慧机场建设概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.

[11] 李小将. 数字孪生机场架构及应用研究[J]. 民航学报, 2024, 8(4): 47-50.

[12] 易宏杰. 基于BIM技术的数字孪生机场的探索[J]. 中国航班, 2024(5): 25-29.

[13] 国家数据局. 数字中国建设典型案例（第一批）[Z]. 2024.

[14] 中国民用航空局. 2025年度交通运输行业数智交通推荐技术汇编（民航领域入选案例）[Z]. 2025.

[15] 聚焦智慧民航 | 数字孪生：透过镜像 可观未来[N]. 中国民航报, 2026-07-29(5).

探秘铁路货物列车工厂

——在半实物仿真沙盘中了解编组站

中国仿真学会离散系统仿真专业委员会

铁路货运像一张流动的网络，编组站则是网络中最忙碌的“分拣中心”。一列货物列车驶入编组站时，车厢里可能装着煤炭、钢材、粮食、集装箱等不同货物，去向也不完全相同。为了让车辆各归其路，它们需要在这里重新排序、重新组队，再奔向各自方向。这就是编组站被称为“货物列车工厂”的原因。

在北京交通大学交通运输科学馆，采用HO比例高度还原三级三场编组站作业场景，它不同于只能观看的静态模型，而是一套半实物仿真平台：股道、道岔、信号机、调车机车和货车实体呈现，车辆运行、进路开放、信息采集和控制决策均由仿真系统控制完成。沙盘通过半实物仿真把“看得见的模型”和“算得动的系统”结合起来。



图1 编组站沙盘实景

铁路人常用**“到、解、集、编、发”**概括编组站作业。列车先进入到达场，完成车号识别、货检、列检等技术作业；随后进入“解”，也就是解体。驼峰机车从车列后方推送车辆上峰顶平台，车辆被摘开后依靠重力顺坡溜放，经道岔进入指定股道。接着，同一方向的车辆在调车场集结，再按列车编组计划重新连挂成列，最后进入出发场，完成出发技术作业后驶向下一站。



图2 编组站“到-解-集-编-发”技术作业流程

在半实物仿真沙盘上，这套流程不只要“演出来”，还要“控得住”。平台通过电子标签读取车辆信息，利用摄像机进行目标检测和位置辅助计算，并借助心跳包上传速度、方向、计划和技术状态等参数。当某类传感信息短时失效时，系统还能结合运动方程推算位移，再用多源数据校准位置。这样，沙盘中的每一辆车不仅有外形，也有可被系统识别和跟踪的“数字身份”。

编组站作业牵涉大量设备移动和进路排列，哪条线路能开通、哪台机车能行动、哪个区段已被占用，都必须满足安全约束。沙盘平台配套**列控模块**负责机车操控、**联锁模块**负责进路开通和占用检查，二者协同才能让机车车辆按计划运行而不发生冲突。对于驼峰解体中的摘钩环节，平台还设计了**摘钩控制模块**与执行终端，模拟自动摘钩作业。

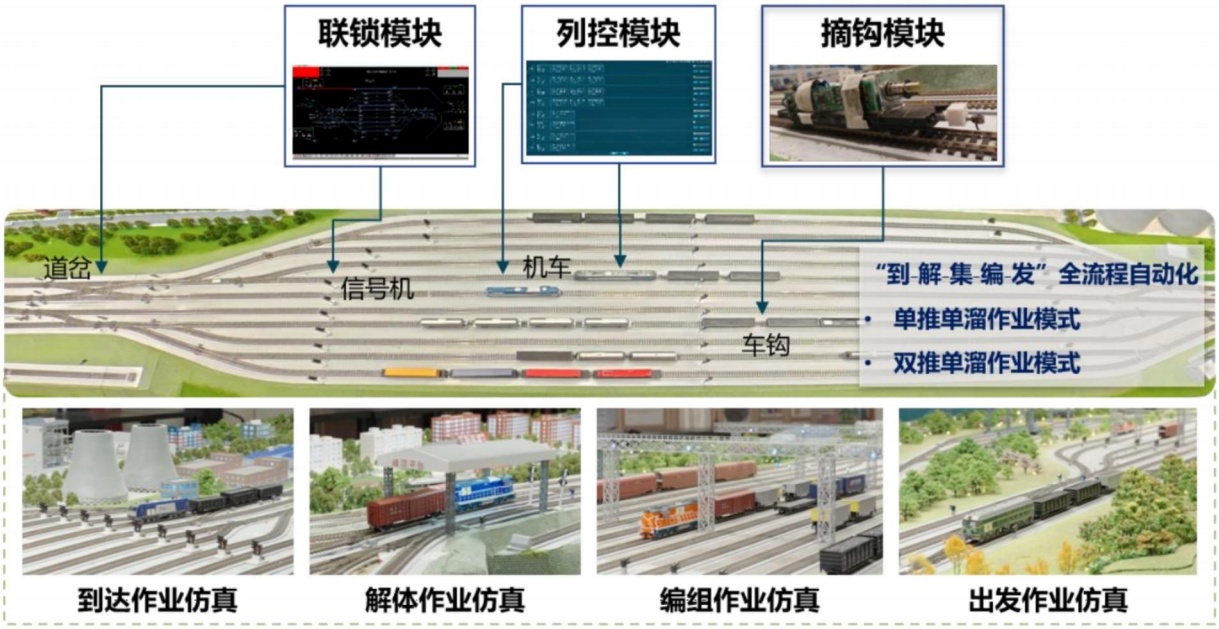


图3 编组站技术作业仿真

编组站的价值，不在于让某一列车跑得更快，而在于让整个货运系统更有秩序：该分开的及时分开，该汇合的准确汇合，该检查的不能漏过，该出发的准点出发。这座不常被旅客注意的“货物列车工厂”，支撑着能源运输和日常生活物资流通。

仿 真 天 地

FANGZHENTIANDI·2026年04期

主办：中国仿真学会

科普专栏·《仿真天地》编辑部

倡导科学方法·传播科学思想·弘扬科学精神