

数字物理元宇宙——工业仿真软件发展思考与展望

陈沪东^{1,2}

(1. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310027; 2. 浙江大学上海高等研究院, 上海 201203)

摘要: 本文提出了数字物理元宇宙的理念, 旨在明确和拓展工业仿真软件的核心内涵, 突破工业仿真软件在通用性、易用性、算力及算法等方面的局限性, 为工业仿真软件的未来发展提供理论支持与实践参考。全面把握从计算物理到工业仿真、从工业仿真软件到数字物理元宇宙的认识历程, 在比较分析的基础上论述了数字物理元宇宙的基本内涵; 进一步界定了数字物理元宇宙与工业仿真软件的异同关系, 阐明了数字物理元宇宙的时效性、广适性、洞察性、非扰性、普及性等优势以及对教学及基础科研的积极促进作用。针对构建计算物理核心技术的领先地位、核心技术紧密联系实际应用、打破专业壁垒并促成跨学科知识交汇、改变传统工程研发的惯性并激发工程师的参与度等数字物理元宇宙的发展难点, 提出了数字物理元宇宙的发展路径: 成立跨学科的教学与科研中心, 开发以数字物理元宇宙为框架的教学软件, 建立与工业应用相结合的研发基地, 设立独立的验证机构和学术交流平台。数字物理元宇宙作为工业仿真软件的高阶形态, 将重构工业实验范式, 为教学与基础科研提供全新的工具和体验, 促进我国在新一轮国际科技竞争中抢占战略先机。

关键词: 数字物理元宇宙; 工业仿真软件; 数值模拟; 多物理耦合; 虚实互动

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A

Digital-Physics Metaverse: Thoughts and Prospects on the Development of Industrial Simulation Software

Chen Hudong^{1,2}

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Shanghai Institute for Advanced Study, Zhejiang University, Shanghai 201203, China)

Abstract: This study introduces the concept of the digital-physics metaverse, aiming to clarify and expand the core connotations of industrial simulation software, address its limitations in generality, usability, computational power, and algorithmic capabilities, and provide both theoretical support and practical guidance for its future development. By tracing the evolution from computational physics to industrial simulation, and from simulation software to the digital-physics metaverse, the study offers a comparative analysis and elaborates on the fundamental attributes of this new paradigm. The study further distinguishes the digital-physics metaverse from traditional industrial simulation software, highlighting its key advantages, including timeliness, universality, insightfulness, non-invasiveness, and accessibility, as well as its potential to enhance education and fundamental research. To address the critical challenges in developing the digital-physics metaverse, such as establishing leadership in core computational physics technologies, bridging the gap between core technologies and real-world applications, breaking disciplinary silos to foster interdisciplinary knowledge integration, and transforming the inertia of traditional engineering research and development (R&D) to encourage broader

收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-03-27

通讯作者: 陈沪东, 浙江大学能源工程学院教授, 美国国家工程院院士, 研究方向为数字物理建模及工业软件; E-mail: hdc25@zju.edu.cn

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

participation, the study proposes a comprehensive development roadmap. This includes the establishment of interdisciplinary teaching and research centers, development of educational software based on the digital-physics metaverse framework, creation of industry-integrated R&D bases, and setup of independent verification bodies and academic exchange platforms. As an advanced form of industrial simulation software, the digital-physics metaverse is expected to reshape experimental paradigms in industry, provide novel tools and immersive experiences for education and fundamental research, and help position China at the forefront of the next wave of scientific and technological competition.

Keywords: digital-physics metaverse; industrial simulation software; numerical simulation; multi-physics coupling; virtual-physical interaction

一、前言

随着信息技术、计算机技术的迅猛发展，数字化、智能化成为社会进步和工业变革的重要形式。特别是在工程和制造领域，数字化仿真技术得到了更为广泛和深入的应用，显著提升了设计、测试、生产的效率^[1-3]。传统的物理实验、工程设计方法逐步被计算机仿真和虚拟实验替代，工程师、科研人员在虚拟平台上高置信度地模拟复杂的物理过程，更高效地建立设计和优化方案^[4,5]。工业软件作为上述变革的核心组成部分，在诸多行业中发挥了重要作用。

工业仿真软件作为工业软件的重要分支，通过数值模拟手段重现物理世界规律，显著降低了传统实体实验的时间、空间和资源成本，已在航空、航天、能源化工、电子器件等领域取得广泛且深入的应用^[6-10]。不可忽视的是，现有的工业仿真软件仍面临诸多挑战，如通用性受限导致多物理耦合模拟能力不足，易用性欠缺阻碍非专业用户的广泛参与，算力与算法的瓶颈制约复杂场景下的高精度求解^[11,12]。突破这些局限，推动工业仿真软件向更高维度的“虚拟实验室”演进，成为学术界、工业界共同关注的焦点^[13-16]。

当前，工业仿真软件的算法优化、多物理建模等研究进展良好，如计算流体力学、有限元分析等软件已成为例行使用的生产力工具^[17,18]。尽管如此，现有的研究多聚焦单一技术路径改进，而对跨学科协同机制、物理模型与信息技术深度融合的系统性探索有所不足^[17,19]。信息科技领域正朝着数字孪生、虚拟现实方向迅速发展，而数字物理元宇宙理念更明确地强调以科学第一性原理为核心，追求构建严格遵循物理定律的虚拟客观世界，通过沉浸式交互、多尺度耦合模拟来实现从局部实验到全局仿真的跨越。这一理念不仅继承传统工业仿真软件的功能内核，而且通过人工智能（AI）、云计算、虚拟现实技术的深度融合，为工程设计、基础科研、人

才培养等提供新范式^[20]。

本文围绕数字物理元宇宙的核心理念与发展路径展开系统性论述。阐明相关的定义与科学基础，剖析与传统工业仿真软件的本质差异，从时效性、广适性、洞察性等维度论证推动工业研发模式变革的必然性；针对计算物理核心算法、跨学科协作机制、“产学研”融合模式等关键问题，提出切实可行的实施路径。相关内容可为工业仿真软件的未来发展提供理论支持与实践参考，促进我国在新一轮国际科技竞争中抢占战略先机。

二、数字物理元宇宙的概念构建

（一）从计算物理到工业仿真

自牛顿开创经典力学以来，统计物理与热力学、流体力学、化学、电磁学、量子物理、相对论等先后问世。在宏观物理层面，除了数个未知的物理前沿问题（如暗物质、暗能量），自然界中的物理变化规律都可以用物理定律准确且完整地描述。这些物理定律的集合构成自然科学的第一性原理，增强了物理理论的完备性：一旦给定外部条件、自身的初始状态，原则上都可以通过求解这些物理定律所对应的物理方程式，准确获得所有物质的性质和相应的变化过程。理论上，可以完全且准确地重构并预示现实物质世界在时间上、空间中的演化。例如，求解流体力学方程即可获得水在管道中的流动过程，无需依赖物理实验去观察和测量。即使在微观物理层面，所谓的不确定性反映了物质世界的随机本质，而不是对物理规律的描述。物理学家奋斗的动力即在于发现可完整且统一描述物质世界的第一性原理（也称万物理论）。尽管这些物理定律能完全且准确地描述所有物质的（宏观或微观）性质及其演化过程，但是求解相关方程却十分困难，只有相对简单和理想的极少数问题存在严格的解析解；随之衍生出各种求解方法和近似解。在计算

机、信息技术出现之前，从一般的个体测量到验证整体的工程设计，了解物体性质的基本手段主要是物理实验。

在计算机应用成熟后，研究者认识到客观世界中的许多物理过程可以利用计算机来获得答案，即在计算机上数值求解物理方程甚至严格复制对应的物理过程。由此在约 50 年前诞生了“计算物理”这一全新的科学门类，旨在研究和发准准确、可靠、高效的数值方法，应用于各类物理方程及过程的求解。虽然计算物理仍有较大的发展和完善空间，但涵盖的理论体系已基本成熟。例如，可采用数值方法来严格求解麦克斯韦电磁方程组，掌握电磁场在空间以及各类复杂介质中的分布、传播、吸收情况，从而促进通信技术进步。尽管如此，计算机算力以及数据存储容量始终是有限的，数值计算的应用大多局限于单一物理场或单一尺度范围，尚存各类误差。理论上，科学第一性原理完备地描述了客观世界的运动规律，但通常难以求解所有时 / 空尺度及其组合，因而研究者仅能聚焦某一个客观问题的局部物理范畴和局部的时 / 空尺度范围。相应催生了物理统计闭合模型、近似模型的研究学科，目的是建立对局部物理问题的完备性和封闭性描述，拓宽物理范畴、尺度范围的适用度以及与其他物理和尺度的作用关系，缓解计算机算力对物理计算的限制和束缚。

在过去的 30 年内，计算机、信息技术飞速发展，数值计算方法、各类物理和数学模型不断完善，支持研究者通过数值模拟方式深入认知客观世界中的实际问题。相关技术进步催生了工业软件尤其是工业仿真软件并使之成为重要的新兴工业领域。目前有大量相对成熟的工业仿真软件，基础应用涵盖结构力学、材料力学、流体力学、化学反应（含燃烧）、声学、热传输与管理、电磁学、光学等物理领域，工程应用涉及汽车、航空、航天、船舶、电子、能源、材料、化工、建筑、气象预报等应用门类。工业仿真软件是构建现代工程设计、产品研发新范式的关键支撑，广泛渗透到工业生产过程并发挥着不可或缺的作用。例如，建筑工程师使用工业仿真软件，全面、定量地分析大跨桥梁设计方案中的三维受力分布，支持材料选型甚至指导设计方案修改，在很大程度上减小了建造实际桥梁模型并进行物理实验的必要性。

（二）从工业仿真软件到数字物理元宇宙

工业仿真软件的第一个基本特点是“他用性”，即提供给工程师和产品研发人员使用，而不仅是软件程序开发人员自己使用的工具。传统的科学计算程序多由科学家或科研团队为特定科研课题自行开发和使用，在高校、科研院所中常见，但存在关键缺陷：科学家或工程技术人员为研究某一物理问题需自行编写软件程序，而他们通常并非计算机架构和软件技术的专业人士，可能影响软件程序的计算效率和可靠性。工业仿真软件是由专业技术人员为科研和工程技术人员构建的工具，以软件的形式呈现，支持用户高效、精准地解决复杂问题；相关用户多是产品设计与性能分析的专家，无需精通计算方法或软件编程。工业仿真软件的“他用性”是广义上所有应用软件具有的基本属性，只是服务对象局限在科研和工程技术人员层次。鉴于“他用性”，工业仿真软件的使用界面需要满足“易用”的核心要求，支持用户快速、准确地掌握使用方法并高效完成任务，包括前处理、后处理两个主要方面：前者分为问题设置、几何建模、参数确定等，后者涉及数据分析、图像显示等。工业仿真软件“易用”，意味着可以快速搭建复杂的物理实验环境，将实验结果直观且便捷地呈现；也为融合 AI 技术提供便利条件，将在最大程度上减少人工操作。使用界面、核心算法构成工业仿真软件的完整系统，与科研人员自编自用的科学计算程序有着本质的区别。过去，很多大型工业企业（特别是飞机制造公司）在内部自建科研团队和研究中心，主要任务之一就是编写模拟实验的科学计算程序（如计算空气动力学程序），这一模式已逐渐被工业软件取代。

工业仿真软件的第二个基本特点是“通用性”，即为解决一类科学或工程问题而设计，而非针对某一个特定的物理课题专门编写。以支持热管理研究的工业仿真软件为例，可应用于电子器件的设计与优化，电机、电池的热性能及安全模拟测试，能够处理的参数范围覆盖不同的空间几何构造和物质性质。同时，工程技术人员也会反复使用工业仿真软件以不断地修改并扩充设计方案。这就要求工业仿真软件的物理范畴需尽量全面涵盖可能出现的各类情况，支持用户及时得到求解结果。随着计算物理核心算法、计算机算力、信息技术能力的不断提升，工业仿真软件的“通用性”将进一步拓展，从

专门研究某一类物理过程提升至多物理、多尺度过程的“动力耦合”，更好适应现实世界中的真实情况。最终，工业仿真软件将发展成为完整解决工程技术人员关心问题的数字实验平台。

整体来看，工业仿真软件是为工程实验人员构建的虚拟实验室，以数值求解物理方程的方式去模拟科学和工程实验过程，以数字的形式去重构真实的客观物理世界，进而部分或完全取代实际物理实验。需要指出的是，工业仿真软件的名称带来了一些潜在的误解，即被认为适用范畴仅限于工业制造。为了澄清这一潜在的误解、更形象化地定义工业软件的核心内涵，本研究提出了“数字物理元宇宙”概念，作为对工业仿真软件概念的拓展。①与工业仿真软件的内涵一致，数字物理元宇宙强调“数字物理”，即以科学第一性原理、物理定律为核心，通过数字形式、数值模拟等手段，完整并准确地描述客观世界。②数字物理元宇宙也强调元宇宙，即构建全面且真实的三维空间以及随时间变化的虚拟世界。计算机、信息等技术尤其是最新的AI技术，将创造可直观感知数字世界的全新环境；拥有沉浸式的体验、将完全虚拟的三维世界生动呈现出来，也是元宇宙的基本特征。与近年来国际流行的数字孪生、虚拟现实等概念有所区分，数字物理元宇宙将更形象、更定量地定义工业仿真软件的核心内涵与发展前景：以科学第一性原理为核心，集成计算物理、综合数字信息技术而形成的仿真软件体系架构。

（三）数字物理元宇宙的基本内涵

数字物理元宇宙以科学第一性原理为核心，采用数字的形式重现真实的客观世界，在诸多方面与元宇宙存在关键区别。一般意义上的元宇宙概念，局限在动画、影视、通信等社交和生活场景软件的功能层面，呈现的图像、影像等多为“形似”。与之相对，数字物理元宇宙将科学第一性原理嵌入元宇宙，能够构建严格符合物理定律的虚拟客观世界；涉及的虽是虚拟客观世界，但其中的任何变化都严格遵循真实客观世界的运动规律，由此真正实现以物理为规范的虚拟现实、数字孪生。人们可以通过数字物理元宇宙来认识和体验真实的物质世界，即在虚拟世界中观察和测量以获得对实际物理过程的定量了解。

相比工业仿真软件，数字物理元宇宙更加强调关于待解决问题的直观性认识。“数字风洞”是数字物理元宇宙的具体呈现形式之一，即构建虚拟的风洞，开展飞行器的空气动力学试验，其中的几何构造、吹风速度等物理参数都严格对应实体风洞。气动工程师可在其中就飞行器的三维数字几何模型开展试验，测量出该飞行器的空气动力学特性，用于评估并改进飞行器布局方案。相应的测量过程、操作控制界面皆与实际风洞一致，因而数字风洞、实际风洞的使用人员可以顺畅衔接，在数字风洞中沉浸式地观察关心区域的流动变化情况，获得相较实际风洞实验更为直观全面的流场信息。

工业仿真软件、数字物理元宇宙都涉及对规模巨大的四维时/空数据进行分析和运算，因而提高相关过程的时效性是推广至实际工业研发流程的重要前提。使用超级计算机（超算）进行大规模计算，对海量数据进行分析、处理、传输、存储是例行工作，需要配置超算中心、数据中心、云计算以及能源供应等基础设施。由此衍生出应用模式的变化：传统的工业软件是软件开发商为用户提供软件，用户在自有计算机上开展模拟运算；数字物理元宇宙则是要建设虚拟实验室/基地，集成大规模的超算和数据资源，为用户提供可用的虚拟试验环境及服务。

数字物理元宇宙是针对工业仿真软件核心内涵的更为形象且明确的定义，属于数字仿真、计算模拟类软件的理想实现形式，支持构造虚拟的真实客观世界、以物理定律为基准的虚拟现实；不同于一般意义上的元宇宙，主要面向科学和工程实验的技术人员。数字物理元宇宙是基于计算机、信息技术尤其是AI技术充分发展前提下的终极形式，相关理念已经在部分实际应用中初现端倪。从宏观层面看，数字物理元宇宙既是一种技术理念，更代表着为科学研究和工程开发构建的完整数字生态体系与智能化环境，将从根本上改变人类认知和探索客观世界的方式，推动科学发现与工程创新。

三、数字物理元宇宙的发展价值

第三次工业革命以信息技术为核心，推动工业范式的深刻变革，涵盖计算机、通信、数据处理、互联网、云计算等多个领域。在此背景下，软件工

业应运而生并蓬勃发展，成为现代工业创新的关键驱动力。工业仿真软件工业作为在通用软件工业基础上发展的特殊分支，是信息软件技术、计算物理核心深度融合的产物，促成工业制造、工程研发效率的大幅提升。当前，以AI技术为代表的第四次工业革命加速到来，数字物理元宇宙概念是这一技术变革的必然呼应。

（一）数字物理元宇宙与软件工业

工业仿真软件是软件工业的重要组成部分，在一定程度上代表了软件工业的发展水平。研发工业仿真软件极具挑战性，需要核心技术的长期积累、软件架构的系统集合：物理核心模块研发多由具有计算物理专业知识的科技工作者深度参与，作为物理科学、软件技术的结合体，在研发过程中需要计算物理的科研人员、软件工程的技术人员进行密切合作；应用目标是高复杂度、高难度的实际工程问题，研发人员应深入了解工程问题。

2000年以来，工业仿真软件这一工业门类逐渐成熟，开始呈现快速成长和整合的趋势，也出现了一批世界知名的工业仿真软件品牌，如Cadence、Ansys、Autodesk、达索系统、西门子等。而在国内，由于早期对工业仿真软件的作用及价值缺乏足够了解，这个工业门类并没有得到系统性发展；虽然众多的工业企业已有广泛应用，但基本上是外国公司提供的产品。

近年来，有众多本土工业仿真软件开始涌现，但结合笔者的工作经历和行业观察看，国内的工业仿真软件行业整体上处于先发国家20年前的发展阶段，没有形成世界知名、被国内外主流企业深度应用的工业仿真软件品牌。工业仿真软件的全面发展事关国家高科技工业的生存与发展，甚至影响未来的教学和科研模式；尽管与世界先进水平尚存明显差距，但仍需迎难而上、着力攻关，一旦全面突破，将促进产业竞争力质的提升，彻底解决产业发展“卡脖子”风险。此外，工业仿真软件的快速发展与近年来AI技术爆发有着相似的规律：只有在计算机算力、信息技术达到足够成熟的水平后，长期的技术积累才能催生突破性的进步。正是AI技术的跃迁，促进国产工业仿真软件在工业领域的铺开应用，成为推动现代制造、工程研发的重要工具。基于科技领域的整体进展，笔者认为现阶段是

国产工业仿真软件转入快速发展的机遇期。曾经存在可迅速弥补这一差距的捷径，即收购拥有相关核心知识产权的工业软件（初创）公司，但过去10年期间这类公司较多被大型厂商整合，导致此条捷径已不再具有可实现性。可以预判，尽管会经历更长的发展周期，但仍要下定以自主研发为主的发展决心，创立具有自主知识产权的核心技术和全套软件体系。

工业仿真软件可视为数字物理元宇宙的初级阶段形式，加快发展工业仿真软件乃至数字物理元宇宙的整体架构，事关高科技工业的发展和新质生产力构建，应作为软件工业大国建设的长远战略内容。在第四次工业革命加速到来的背景下，适时提出数字物理元宇宙概念，有利于统筹推动工业仿真软件的发展，论证形成整体框架与行动路径。这一理念进一步明确以物理为核心的数字世界创建方向，倡导突破传统的工业仿真软件使用模式，建立基于大算力、大数据、云服务的虚拟实验中心；在国际上尚未形成普遍认知和宏观趋势的情况下，国内可以考虑统筹发展、先行一步。

（二）数字物理元宇宙的优越性

数字物理元宇宙达到理想状态时，结果准确性、总的周转时间、物理全面性、用户界面和数据处理的智能性及直观性等都将进入高水平层次。数字物理元宇宙的发展不仅标志着计算物理和软件技术的显著进步，而且能够带动信息技术、智能科技以及相关领域的基础设施综合构建，在战略层面上直接促成科技和工业生态的重大演进。相较真实的物理实验，基于数字物理元宇宙的虚拟实验具有诸多优越性。

1. 时效性

虚拟世界里的各类实验环境、实验物体均以数字形式呈现，很容易进行修改或调整；在高效的计算程序、便捷的使用界面、充足的算力支持下，虚拟试验可以反复开展，无需消耗样品材料、不涉及模型制造，便于推进多种设计方案的验证、改进和优选。实体试验的时效性难以显著提升，导致传统的实验方式经常与工业流程脱节，不利于工程实验和工业研发活动融入快节奏的现代工业生产流程。虚拟试验可在短时间内完成甚至进行多次重复，体现出来的“时效性”将促成更全面和深刻地了解待

研究问题，加速新概念发现、新产品创造。

2. 广适性

虚拟实验能够建立实际试验中做不到的实验环境，也能测试实验室条件下无法实现的物理情况。例如，实体风洞受到尺寸限制，飞行器试验模型需要按比例缩小尺寸，导致测试结果与实际情况可能存在差异（尽管有时可用标度率变换来修正）；常规实体风洞难以模拟飞行器在高攻角、跨声速、超声速条件下的飞行状态，导致相关状态下存在空气动力学方面的未知问题，给飞行器设计带来一定的风险；实体风洞中也无法复现飞行器的机动飞行状态。然而，数字风洞应用具有广适性，基本上不存在上述限制，原则上能够测试飞行器的所有状态，对于全面衡量并深入评估新型飞行器的适用范围、尽量减少未知设计因素、全面实现预期性能目标而言尤为关键。

3. 洞察性

虚拟试验可提供实体试验无法获得的信息。在经典的物理试验中，事先确定好待测量的物理量、测量位置，如在被测物体表面或周边的特定位置上布置速度、温度传感器。然而，尽管实验探测与观测技术持续发展，但许多关键物理量依然难以测量甚至无法获得，如发动机内部、核聚变装置内部的流场速度和温度的三维分布及动态演化。与之相对，虚拟试验不受物理和技术条件约束，可获取物体表面及周围的速度、温度分布，以高分辨率、全空间的方式揭示全域数据；根据全域数据即可直接导出物理场的各种（微分和积分）函数组合，为进一步应用空间AI、分析AI提供了必要的条件。区别于实体试验的“知其然”，虚拟试验具有的洞察性将促成“知其所以然”。

4. 非扰性

虚拟试验可以真正避免测量对实验环境的干扰，这是因为在虚拟的数字世界内待测的物理量都是数值的自然输出。实体试验依赖观察和测量手段，即观察和测量的过程也是与实际物理的相互作用过程；对原来的试验状态造成干扰，可能偏离原定的物理状态（包括探测点附近的物理状态、整体性质的变化）。对客观世界的探索越深入，关于实验测量干扰的情况越需重视，通常应谨慎地设置实验探测装置，如探头的形状与物体表面尽量融合。然而在部分情况下，无法确定这些“微小扰动”是否会

对结果产生实质性的影响，如湍流对测量具有极高的敏感性，相变过程、量子力学特性等对测量高度敏感。此外，实体试验的环境设置也会影响试验结果，如风洞试验中模型的尾撑直接影响失速测量的结果。然而，虚拟风洞试验中不涉及模型的尾撑，自然不存在实体试验中的相关干扰效应。虚拟实验具有非扰性，支持测量预期的客观试验情况，较实际实验更显“真实”。

5. 普及性

虚拟实验降低了试验门槛，支持更多的工程技术人员和研发机构参与工程试验活动，在工程设计及验证方面具有更强的探索力和创新力。一些关键和重大的试验项目具有高度的复杂性，对专业设备和设施提出严苛要求，只能在少数具备特定条件的实验室或试验基地开展，通常只有具备丰富经验和高度专业性的资深专家才有能力参与试验。这类高端且昂贵的实验室综合运行成本较高，对应用机构而言不容易接受，如汽车公司的新车设计样品需要开展风洞试验、碰撞试验，时间周期受限且资金投入较大，可能影响项目进度甚至质量。虚拟试验是在虚拟环境中进行的，各个层级的科研和工程技术人员都可以操作实施，各类创新设想都可以探索和验证，无需担心失败的后果（除了算力成本和时间）；依靠网络通信和云计算能力，试验活动可在任意地点和各类机构内开展。虚拟实验的普及性在实验去中心化、克服过高的应用门槛、发挥科研和工程技术人员积极性与创造性等方面具有重要作用。工业仿真软件在先进制造业中得到广泛应用，普及性是重要原因之一。

（三）数字物理元宇宙与教学及基础科研

数字物理元宇宙对教学及基础科研模式也会产生潜在的影响。传统的教学活动主要在课堂，很少通过直观和互动的方式展现物理原理，学生去实验课进行观察和体验仅作为授课的补充。通过数字物理元宇宙和AI技术，可以生动且定量地呈现各类物理现象，让学生获得对物质世界的直观和沉浸式体验。数字物理元宇宙易于操作，学生甚至可以在自己的个人电脑上进行基本物理的虚拟实验。可见，数字物理元宇宙可作为教学工具，向学生提供虚拟实验室环境，也为数字工业发展培育人才基础并提供惯用工具。

合理推想，数字物理元宇宙将改变人们的学习和思维方式，为基础科研提供全新的平台，推动形成更加高效的科研模式。在传统的基础科研实践中，物理实验通常依赖实际的试验操作，或由研发团队自行编写数值模拟程序以验证特定的物理现象。在实际试验存在局限性之外，许多研发团队独立开发的数值模拟程序在功能和结构上存在大量的相似性与重复性，这是科研实践中的普遍性问题。数字物理元宇宙可在很大程度上缓解这一困境，不仅提供更加统一和高效的技术支撑，而且集成强大的计算与仿真能力。以此为依托，基础科研人员可以将精力聚焦到物理问题的思考与创新，不再被重复、专深的编程工作所牵制，从而更加便捷地构建和设置各类物理场景、更高效地获得仿真结果。这类基础科研模式的改变，将大幅节省科研时间和精力，促成更具广度与深度的物理研究。

数字物理元宇宙可带动教学及基础科研模式的变革，但数字仿真等类型的软件尚未融入教学及基础科研领域，重要原因之一是软件开发企业相关投入不足，软件不成熟、不完整、不易使用以及不能灵活地输入和改变物理条件与关系式等。教学及基础科研领域人员众多，是极大的潜在用户群体，因而开发更具针对性的数字仿真软件版本具有明确价值。

整体来看，数字物理元宇宙事关新型工业、教学科研的未来发展形态。就当前的科技和工业发展阶段而言，系统筹划并布局数字物理元宇宙理念框架的时机已经成熟。尽管一些先发国家在工业软件领域的发展具有优势，也形成数字孪生、虚拟现实方面的普遍认知（即向数字物理元宇宙理念发展成为自然趋势），但笔者认为在相关国家并未形成以科学第一性原理为规范、清晰完整的发展意识。实际上，我国在信息软件技术、智能科技方面处于国际前沿梯队，提前构思、规划并实施数字物理元宇宙的框架，有助于把握战略先机。新型科技产业的发展分为“自下而上”“自上而下”两种途径：前者是基于社会需要而自发形成的自然趋势，后者是为长远利益而实施的前瞻规划引导，两者相辅相成，而对于后者我国更有明显优势。

四、数字物理元宇宙的发展难点

推进和实现数字物理元宇宙，首先需要认清工

业仿真软件、数字物理元宇宙的特殊性。数字物理元宇宙以科学第一性原理为核心、信息软件整体组成为中心支柱。① 核心任务是建立求解物理方程的数值计算方法以及必需的物理模型，要求直接研究者在计算物理、应用数学方面均有极高的知识水平；为了提供切实可靠的虚拟实验平台，要求直接研究者对复杂的实际工程问题有深入的了解，才能确保相关物理系统适应工程应用的场景和要求。② 跨学科、跨技术领域性，计算物理科学、软件工程的有机结合体，决定了需要资深的物理学家、软件工程师通过深度合作才能实现预期的软件能力。发展数字物理元宇宙是一个系统工程，依赖信息技术和大规模计算技术，需要数个科技门类的深度融合。

（一）构建计算物理核心技术的领先地位

数字物理元宇宙的终极目标是重构真实的客观物理世界，位于核心层次的数字物理算法和模型必须准确，这是因为衡量工业软件性能优劣的最重要指标即为物理过程的计算结果准确度。值得强调的是，计算物理的核心不仅有计算方法，还包括各类关键的物理模型，如统计湍流学、大涡模型对湍流模拟结果准确性的影响甚至超过了计算方法精度的影响；相关算法的效率及鲁棒性也极为重要。数字物理元宇宙的核心技术包括先进的计算物理算法，整套计算软件总体架构，各种物理模型、边界条件处理、不同物理过程及尺度的精准耦合等。在真正全面掌握计算物理核心技术之前，很难出现自主可控的工业仿真软件产品及品牌。目前公开可用的相关技术普遍存在缺陷与局限，不能代表国际最前沿的水平；真正关键且处于前沿的核心技术往往并不对外公开发表或展示，只有依靠长期积累与持续攻关、投入必要的智力资源才能确保可靠掌握。在构建自有核心技术的过程中，可以借鉴但不能完全依赖这些公开的技术信息。

（二）核心技术紧密联系实际应用

虽然在核心技术研发方面与国际先进水平有一定的差距，但国内并不缺乏优秀的科技人才和基础核心算法。关键在于推动基础核心算法与信息技术、软件工程技术的紧密结合，逐步完善物理模型及其耦合、使用界面等实际工程应用的各个环节。

计算物理学家、应用数学家往往对如何契合实际应用缺乏充分的理解，导致很多核心算法的基础研发多关注理想情况，而忽视现实应用的关键要求与限制条件。推动应用科学研究并与实际应用相联系的难度较大，如在科技向生产力的转化率方面，相较于国际先进水平（超过50%）而言我国尚有很大的改善空间。解决这一问题的有效途径之一是扩展科技成果评价的维度，对于应用科技的成果而言既要关注发表论文和国家科研基金支持，也要审视（国内和国外）工业界的认可与接受程度以及能否支持工业界解决工程研发中的关键实际问题甚至取得重大突破。以此激励与相关工业应用企业建立更有效的合作，获得及时反馈甚至经济资助，形成有机闭环。

（三）打破专业壁垒并促成跨学科知识交汇

科学技术领域存在着传统的划分，多数人员的科研行为往往限于狭窄的专业方向，这是因为追求专业的高深发展需要在专业方向上深度耕耘才能越过知识门槛并有所作为，导致科研人员通常不关心其他专业方向。计算物理核心技术突破对于数字物理元宇宙的成功至关重要，而数字物理元宇宙是计算物理、信息技术、软件工程等学科的综合；吸引科研人员跨出自身学科范畴，在多个专业方向之间深入合作并形成工业研发合力，需要打破科学技术领域的传统结构划分，建立跨学科的横向知识交汇机制。

信息技术、软件工程人才数量较多但普遍缺乏专深的物理科学知识，而应用物理、计算数学人才没有广泛参与工业仿真软件研发，这是各类应用软件蓬勃发展，而工业仿真软件没有获得同等发展的主要原因之一。此外，工业仿真软件公司的许多编程人员是物理、工程相关专业而不是信息、计算机专业毕业的，在校期间没有接受信息、计算机技术方面的系统教育，因而需要通过自学习、再培训等方式获得工作岗位所需知识。无需强调培养全能型的科技人才，而是引导专业门类的人员能够有效掌握直接相关领域的知识与认识，以此为目标开展跨学科合作。跨学科交流有助于科研人员跳出原有的知识和思维框架，甚至获取新的思路和方法，对科研人员本身的专业研究产生促进和扩展作用。跨学科交汇也可能孕育出新的独立学科和专业门类，如物理与应用数学交汇形成计算物理、化学与生物学

交汇形成生物化学、物理与计算机科学交汇形成AI学科。在过去的数十年里，国内外的学术界一直开展相关的探讨和尝试。

（四）改变传统工程研发的惯性并激发工程师的参与度

工业仿真软件（尤其在国内）发展缓慢的另一原因是工业界的传统工程研发模式。相关模式主要分为倾向于具体实际试验、自有研究团队开发数值计算程序两种，都存在明确的缺陷，导致研发活动、产品需求与生产过程脱节，在大公司内部这种现象尤为突出。尽管当前的工业仿真软件远未达到可完全取代实体试验的程度、易用性也有待提升，但与其他新技术一样，工业仿真软件发展呈现出不断实践、发展、完善的过程。数字物理元宇宙的发展目标之一就是为工程师提供与传统实验室相同的甚至更好的设计支撑和工作环境，打破工业仿真软件应用的技术壁垒，最终全面取代具体的实际实验。需要听取一线使用者的意见和反馈，支持并促进使用者参与数字物理元宇宙发展及完善过程。工程师的工程经验和数据是促成工业仿真软件提高的关键基础。

五、数字物理元宇宙的发展路径

（一）成立跨学科的教学与研究中心

建议设立跨学科的教学与研究中心，容纳物理（含力学、化学等理工科专业）、应用数学及计算方法、信息科学、计算机科学、数字技术与软件工程学、AI、管理学等专业，以优先全职、许可兼职的方式聚集高水平研究人员。以实现数字物理元宇宙的总体理念为目标，形成开放式的教学与科研基地，设计完整且有特色的教学课程体系，着力培养工业软件门类的研发和使用类专业人才，兼顾为高科技初创公司提供技术孵化的基础条件。该中心内以数字物理元宇宙为基本框架，为特定的工程应用单位、工业软件企业提供学习和交流平台；经常性地组织学术交流专题研讨会，邀请工业界的专家进行学术报告、讲授工业应用相关课程，拓展教师和学生的工程视野；提供短期培训班、长期教育课程，成为面向工程技术人员的工业仿真软件高水平培训基地。“产学研”合作是发展数字物理元宇宙

的必要条件，跨学科的教学与科研中心将是创造这一条件的重要基地。

（二）开发以数字物理元宇宙为框架的教学软件

在跨学科的教学与科研中心内推进，或者采用独立科研项目的方式，开发以数字物理元宇宙为框架的教学软件，建立用于物理教学的虚拟实验室，针对各类物理现象及过程提供虚拟实验体验，支持物理知识教学，部分或全部取代传统的实验课。相关教学软件的基本要求是准确性、易用性、直观性、生动性。准确性是教学软件能力的基本要求。易用性指学生可快捷地设置实验过程、自动分析并整理结果，无需繁琐的手工操作。实现易用性需要精细规划和研究投入，确保教学软件的应用“门槛”足够低。直观性、生动性赋予学生与实际实验过程相同甚至更形象的体验，以构建沉浸式的虚拟现实世界为最终目标。实现相关教学软件的基本要求，也依赖AI技术应用能力。可行的实施计划是“由点到面”，从单一物理领域逐渐拓宽至多个物理领域，根据研发团队的基本力量而定。例如，可从低雷诺数、低马赫数的牛顿流体逐步扩展到非牛顿流体、微流、有限 Knudsen 流、可压缩流体、热力学、多相流及相变、物质与粒子传输、磁流体、化学反应、沸腾过程等，再扩展到结构力学、电磁场等其他物理领域。

数字物理元宇宙教学软件的应用将对革新教学模式产生积极影响，增强学生使用工业仿真软件的技能，帮助学生方便直观地观察和探索各类物理现象及其内在本质，培养并强化学生的物理直觉（人类的大脑思维与当前的机器学习的关键区别在于前者有直觉、形象思维、想象力）。基础科研人员也可以利用教学软件研究感兴趣的基础物理现象，减少实际物理试验、自行编写程序等方面的需求。此外，相关教学软件在众多学生和科研人员熟悉并应用后，将产出可观的经济和社会效益，成为教学和科研应用的主流。相关教学软件可由研发机构、超算中心以计时计费的云服务方式对外提供，契合信息化时代的技术需求与使用习惯；软件的研发过程也将为工业仿真软件体系的发展提供可行路径和技术支撑，在培养具有交叉学科能力的基础技术人才方面发挥重要作用。

（三）建立与工业应用相结合的研发基地

数字物理元宇宙的研发基地可以附属于跨学科的教学与科研中心，也可以独立机构的方式运行。确立数字物理元宇宙的发展宗旨，立足自身团队的核心技术强项与资源，吸引技术背景相近的工业应用企业加入，组建研发和应用联合体。在该联合体的运行方式上，直接隶属某个学术机构或工业企业可能不够理想，而以初创科技公司的形式附属在相关学术机构或工业企业较为可行。相关研发基地的直接目标是为特定的工业领域研发应用仿真软件，各级开发版本直接由合作企业进行使用和验证，由此精准支持单项技术从初级走向成熟。软件研发人员也可直接触及新型工业研发的实际情况，促进发展切实可行的应用软件。该联合体与企业内部的研发中心有着本质区别：独立于特定公司，具有初创公司的运作模式和自由度，旨在开发面向一类工业过程普遍应用的软件，而不是为特定公司解决专有问题。参与联合体的企业享有优势：应用层面的意见在软件研发过程中能得到及时和直接反馈，契合工程实际需要；可将联合体视为相关企业本身技术研发活动的外延组织，在合同约定的条件下共享联合研发成果的知识产权与商业回报。

需设置专门的应用管理团队，全面把握工业应用的各种要求，收集并设立与工程应用直接相关的测试验证题，用于软件各级版本的验证和评估，再将评估信息反馈给研发和应用团队。应用管理团队独立于软件研发团队，规避软件研发人员的主观偏见和倾向性判断；推动研发、应用两方面的沟通联络，与“质量保证”团队功能有别。在专业运营能力的推动下，数字物理元宇宙整体技术框架逐步优化并趋向成熟，与超算中心、数据中心紧密合作，构成虚拟实验室/基地的坚实基础，为工业生产过程提供有效服务，加快构建“自我造血”、内生长能力。

（四）设立独立的验证机构和学术交流平台

工业仿真软件的成熟度稳步提高，在工业生产中的关键作用发挥得更为充分，相关研发吸引了很多科研团队加入，但也面临无序、无规、离散、重复的风险。工业仿真软件研发将是一个漫长的历程，需要社会上的长期资源投入，但因技术因素复杂而致很难准确衡量开发团队的技术水平与研发效

率；仅依赖少数专家或学术权威的意见可能出现主观偏差，导致真正具有自主创新与技术突破潜力的团队得不到足够和长期的资源支持。可设置相对独立的学术交流平台，以战略方向上具有关键作用、发展挑战性突出的课题为重点，有序扶持工业仿真软件的发展；兼有开放的验证与评价作用，广泛邀请相关研发团队自愿参加，对相关软件的计算结果、整体功能等给出客观评价；平台运行独立于任何研发组织，规避潜在的利益冲突和意见偏向，确保公信度和权威性。

在学术交流平台运行过程中，物理问题由应用单位提出，确保研究结果具有良好的导向性和普遍性；参与研发团队之间进行密切交流，分享对应用问题的直接认识、与实验数据的反复比较，推动行业技术水平的整体性提升；也可定期举办专题研讨会和技术讲座，促进工业仿真软件领域内“产学研”深入交流，起到引导关键应用领域的发展方向、评估不同技术路线的优劣及水平、及时调整未来发展预判的作用。在深化以数字物理元宇宙为框架的工业仿真软件领域发展战略的基础上，学术交流平台还可根据资源条件、应用需求，设立数个具体的应用方向，针对其中的关键问题遴选合适的机构和成员作为主办方，邀请应用、研发两方面的专家深度参与；积极与超算中心、云计算中心合作，为参与者提供计算资源。

六、结语

本文系统探讨了数字物理元宇宙作为工业仿真软件高阶形态的核心价值与实现路径。相关理念强调以科学第一性原理为核心，集成沉浸式交互、多物理耦合仿真技术，充分结合超算、大数据等技术，突破传统工业仿真软件的功能边界，建立科学和工程实验所需的虚拟实验室环境，促成研发效率显著提升、实验成本大幅降低，加速突破理念认知与技术创新局限。数字物理元宇宙具有时效性、广适性、洞察性、非扰性、普及性等优势，有望重构工业实验范式，为教学与基础科研提供全新工具和体验。当然，实现数字物理元宇宙亟待攻克跨学科协同、算法精度提升、自主技术壁垒等关键难题，可采用建立“产学研”深度融合机制、开发通用型工业仿真软件平台等策略，加速我国工业仿真软件

的自主发展进程，为抢占第四次工业革命先机筑牢基础。

展望未来，AI驱动自适应建模、自动分析与优化、虚拟现实显示等是数字物理元宇宙技术突破的主攻方向。数字物理元宇宙对算力、数据存储的需求极高，成为推动包括量子计算在内的算力提升的直接动力。云平台服务将是全面实现数字物理元宇宙的必由之路，在主要的工业应用领域也需开展更深入的应用探索。在实践中，进一步完善以数字物理元宇宙为目标导向、“物理-软件-工程”知识融合的教育框架，加强跨学科人才培养力度及质量。通过技术创新、生态构建、制度保障等的协同，推动数字物理元宇宙从理论愿景到产业落地的全面实现，最终赋能科技与工业生态的深度变革。

致谢

浙江大学能源工程学院罗坤教授、赵阳教授、王帅研究员在研究讨论中提供了宝贵意见和深刻见解，谨致谢意。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: February 26, 2025; **Revised date:** March 27, 2025

Corresponding author: Chen Hudong is a professor from the College of Energy Engineering, Zhejiang University, and a member of US National Academy of Engineering. His major research fields include digital physics modeling and industrial software. E-mail: hdc25@zju.edu.cn

参考文献

- [1] 刘壮壮, 丁明路, 谢建新. 金属3D打印数字化制造研究进展 [J]. 金属学报, 2024, 60(5): 569-584.
Liu Z Z, Ding M L, Xie J X. Advancements in digital manufacturing for metal 3D printing [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(5): 569-584.
- [2] 尚建宁, 刘霓昀, 党秀, 等. 典型中药工厂生产制造系统数字化仿真研究 [J]. 化工与医药工程, 2023, 44(6): 15-20.
Shang J N, Liu N Y, Dang X, et al. Research on digital simulation of the manufacturing system in typical traditional Chinese medicine factory [J]. Chemical and Pharmaceutical Engineering, 2023, 44(6): 15-20.
- [3] 张衡, 曾军, 张剑, 等. 整机全三维仿真技术加速航空发动机研发 [J]. 航空动力, 2023 (3): 30-33.
Zhang H, Zeng J, Zhang J, et al. Accelerating the development of aero engine by full-3D simulation technology [J]. Aerospace Power, 2023 (3): 30-33.
- [4] Amiri M M, Shadman M, Estefen S F. A review of physical and numerical modeling techniques for horizontal-axis wind turbine wakes [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024,

- 193: 114279.
- [5] Jin L C, Zhai X Y, Wang K, et al. Big data, machine learning, and digital twin assisted additive manufacturing: A review [J]. *Materials & Design*, 2024, 244: 113086.
- [6] 胡雅涵, 寇贞贞, 江源, 等. 建材行业工业软件发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 177–187.
Hu Y H, Kou Z Z, Jiang Y, et al. Development of industrial software for building materials industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(4): 177–187.
- [7] 刘文仲. 中国钢铁行业工业软件现状及思考 [J]. *中国冶金*, 2023, 33(8): 1–5.
Liu W Z. Current situation and thinking of industrial software in China's iron and steel industry [J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(8): 1–5.
- [8] 邵珠峰, 赵云, 王晨, 等. 新时期我国工业软件产业发展路径研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(2): 86–95.
Shao Z F, Zhao Y, Wang C, et al. Development path of China's industrial software industry in the new era [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(2): 86–95.
- [9] 陶卓, 黄卫东. 中国工业软件产业发展路径研究 [J]. *技术经济与管理研究*, 2021 (4): 78–82.
Tao Z, Huang W D. Research on the development path of industrial software industry in China [J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2021 (4): 78–82.
- [10] 张健, 周乃春, 李明, 等. 面向航空航天领域的工业 CFD 软件研发设计 [J]. *软件学报*, 2022, 33(5): 1529–1550.
Zhang J, Zhou N C, Li M, et al. R & D and design of industrial CFD software for aeronautics and astronautics [J]. *Journal of Software*, 2022, 33(5): 1529–1550.
- [11] 郭朝先, 苗雨菲, 许婷婷. 全球工业软件产业生态与中国工业软件产业竞争力评估 [J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2022, 42(2): 22–30.
Guo C X, Miao Y F, Xu T T. Global industrial software ecosystem and evaluation of China's industrial software competitiveness [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2022, 42(2): 22–30.
- [12] 刘志迎, 闫天星, 古继宝. 工业软件关键核心技术国际竞争态势研究 [J/OL]. *科学学研究*, [2025-03-15]. <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20240628.003>.
Liu Z Y, Yan T X, Gu J B. Research on the international competition situation of key core technologies of industrial software [J/OL]. *China Industrial Economics*, [2025-03-15]. <https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20240628.003>.
- [13] 贺兴, 唐跃中, 韩焯宸, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(三): 复杂系统群智调控理论及其框架 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(24): 9546–9559.
He X, Tang Y Z, Han Y C, et al. System theory study on situation awareness of energy Internet of things based on digital twins and metaverse (III): Theory and framework for energy scheduling and management considering swarm intelligence [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(24): 9546–9559.
- [14] 贺兴, 陈昱昱, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究(一): 概念、挑战与研究框架 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(2): 547–561.
He X, Chen M Y, Tang Y Z, et al. System theory study on situation awareness of energy Internet of things based on digital twins and metaverse (I): Concept, challenge, and framework [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(2): 547–561.
- [15] 贺兴, 潘美琪, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙的能源互联网认知系统论(二): 面向复杂系统涌现现象的虚拟仿真推演框架 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(11): 4311–4323.
He X, Pan M Q, Tang Y Z, et al. System theory on perception of energy Internet of things based on digital twins and metaverse (II): Virtual simulation and analytical deduction framework for emergency phenomenon in complex system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(11): 4311–4323.
- [16] 谢嘉成, 郑子盈, 王学文, 等. 基于工业元宇宙的综采工作面虚实融合运行模式初步探索 [J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 266–279.
Xie J C, Zheng Z Y, Wang X W, et al. Preliminary research on the operation mode of virtual–real integration in fully-mechanized mining face based on industrial metaverse [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 266–279.
- [17] Fletcher D F. The future of computational fluid dynamics (CFD) simulation in the chemical process industries [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, 187: 299–305.
- [18] Chourdakis G, Schneider D, Uekermann B. OpenFOAM-preCICE: Coupling OpenFOAM with external solvers for multi-physics simulations [J]. *OpenFOAM Journal*, 2023, 3: 1–25.
- [19] Xie Z Z, Wang S, Shen Y S. A novel hybrid CFD-DEM method for high-fidelity multi-resolution modelling of cross-scale particulate flow [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140731.
- [20] Chen H D, Kandasamy S, Orszag S, et al. Extended Boltzmann kinetic equation for turbulent flows [J]. *Science*, 2003, 301(5633): 633–636.