



SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens Digital Industries Software

虚拟核反应堆

采用全面数字化双胞胎开发
极具成本效益的核电站

高层摘要

在本白皮书中，我们将通过多个事例介绍如何将数字化双胞胎技术用于支持日益广泛的核能应用。我们讨论了核工业目前所面临的挑战，以及核工程领域如何使用虚拟反应堆模型和全面数字化双胞胎技术来解决这些挑战。

Stephen Ferguson, Siemens Digital Industries Software

摘要

目前的核反应堆基础设施较为庞大，通常位于人口聚居地以外的偏远地区。

但今后就不必这样了。在不久的将来，核反应堆将成清洁安全的便携式模块化能源。与其位于距离城市数百公里的偏远地带，倒不如将它们安置在用电需求最大的便捷位置。

这样的预测带来了两个难题：我们如何实现这一未来理想？为什么我们现在没有建设此类设施？

尽管这些问题可能有许多答案，但我们认为过度依赖陈旧的仿真工具是核电行业止步不前的最大因素之一。数字化双胞胎技术是改变现状并提供经济可靠核能的唯一途径。

在不久的将来，核反应堆将成为清洁安全的便携式模块化能源。



图 1. 目前的核反应堆通常位于人口聚居地 a 以外的偏远地区。

核能技术开发和部署的全新范式

在 21 世纪，世界各国政府面临的挑战是大幅减少温室气体排放，同时为数十亿人口增加能源开发和经济发展的机会。去年，麻省理工学院 (MIT) 开展了一项由众多研究者参与的跨学科研究并发布了研究报告《核能在碳约束世界中的未来》(The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World)¹。该报告认为，成本低廉的零碳能源具有极大的发展空间，而且“没有 [核能] 的贡献，实现深度脱碳目标的成本将会大幅增加。”

麻省理工学院一个最重要的研究结论是，如果想要实现脱碳目标，就必须迅速采取行动。数据显示，如果认真对待气候变化的最严重影响，那么就需要在不到 20 年、甚至不到 10 年的时间内将清洁能源接入电网。

这是一个重大问题：麻省理工学院的报告指出，“尽管近几十年来其他能源技术的成本日益下降，但新建核电站的成本却节节攀升”，报告观察到“美国和欧洲核电建设项目的最新经验表明，其施工管理实践屡屡失败，完全无法在预算范围内按时交付产品。”

在许多措施建议中，报告提出了全新的核反应堆技术开发和部署范例，其中包括加大虚拟反应堆和数字化双胞胎技术的使用力度，建议采用集成的计算机模拟和建模（而非建造昂贵的示范堆）将开发过程缩短 10-12 年。

在本白皮书中，我们将探讨如何将已在其他行业应用中大获成功的数字化双胞胎技术应用于核能领域，满足其有关验证、物理场精确表示以及不确定性量化等特别要求。我

们认为，采用全面的数字化双胞胎（或虚拟反应堆）方法，既可以将新型核能技术的设计周期缩短一半，同时又可以大幅降低相关许可所需的测试成本。而且，如果不广泛使用数字化双胞胎技术，许多下一代反应堆设计将永远无法通过许可和调试阶段。

持有如此理念的并非只有我们一家：美国能源部最近宣布投资 3500 万美元用于 GEMINA 计划，旨在开发适用于先进核反应堆的数字化双胞胎技术，设计相关工具以便“在核反应堆系统中实现更大灵活性，提高运行自主性，并加快设计迭代速度。”他们的期望是“开发这些数字化双胞胎可将先进反应堆核电站的运行和管理成本降低 10 倍。”² 这些目标极具挑战性，因为其目的是将核电站的维护成本从现有的每兆瓦时 13 美元降到每兆瓦时 2 美元。这标志着将大幅降低核能技术的运行和维护成本。

美国橡树岭国家实验室正在研究一项“转型挑战反应堆”（简称 TCR），旨在使用 3D 打印和增材制造技术彻底改变核反应堆的建造工艺：“我们的目标非常简单：就是采用最新的科技创新建造一个增材制造的微反应堆，然后在核能行业普及这项技术。”³

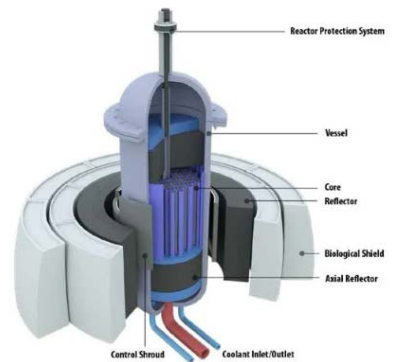


图 2. 橡树岭国家实验室的“转型挑战反应堆”采用增材制造和 3D 打印技术构建而成。

橡树岭国家实验室主任托马斯·扎查里亚 (Thomas Zacharia) 对于数字化双胞胎技术在该项目中的作用直言不讳：“在核心开发制造的同时，TCR 团队还将为核心的每个物理部件开发一个数字化双胞胎。在每个零部件的制造、特征描述和测试之前、之中和之后，设计人员可以通过这些数字化双胞胎来访问所有采集的数据流，以及部件运行的监视结果。”⁴

数字化双胞胎可以采取多种不同形式。在本白皮书中，我们重点介绍高保真数字化双胞胎，它是核反应堆的真实翻版。这种数字化双胞胎不仅可用于设计阶段，而且可以随着实际反应堆的整个使用寿命一起演进。在这种运行模式下，数字化双胞胎可用于控制预测性维护并开发基于模型的全面检测系统。

有关先进反应堆设计的创新想法有很多，我们无法在此一一阐述。我们选择了三个例子来说明数字化双胞胎技术应用用于核反应堆时的价值和潜力。

- **X-energy** 公司的概念是一种球床反应堆，采用三结构同向性型燃料颗粒 (TRISO) 和氦冷却技术，出口温度高 (650 到 700 摄氏度)，可采用小型模块形式交付，发电能力高达 300 兆瓦
- **Kairos Power** 公司使用类似的球形燃料，但它在这里采用了新颖的氟化盐冷却剂，同样具有较高的出口温度和效能
- **TerraPower** 公司开发了一种采用液态金属冷却的行波反应堆以及氯化物熔盐快谱反应堆

尽管这些概念设计都使用了各不相同的技术，但与现行的核反应堆相比，每一种概念的成本都更低、结构更简单；最重要的是，固有安全性都更高。

这些目标极具挑战性，因为其目的是将核电站的维护成本从现有的每兆瓦时 13 美元降到每兆瓦时 2 美元。

数字化双胞胎可以采取多种不同形式。在本白皮书中，我们重点介绍高保真数字化双胞胎，它是核反应堆的真实翻版。

面临的挑战

所有这些拟议的反应堆都面临着一个共同的挑战，那就是既要具有成本竞争力，又可快速投入运行。以往的设计和许可周期需要花费 10 - 20 年，耗资约 100 亿美元。但在当前市场上这显然已不可行。

传统的调试方法高度依赖于单维的系统工具，用于展示拟议的反应堆在设计阶段的性能。这一过程发生在示范堆建造之前，以帮助解决与全新核能概念在燃料、冷却剂和减速剂等新组合方面的诸多不确定性。麻省理工学院的研究结论指出：“鉴于大多数新型反应堆设计的简单性和当今强大的计算能力，我们可以使用计算作为直接工具来建立概念验证（可以消除许多技术风险），从而缩短开发周期。开发一套可以模拟反应堆耦合响应（燃料、冷却剂、结构、设备平衡、安全响应等）的计算机系统是一项巨大挑战，但显然要比另外建造一座示范设施要便宜得多。”

数字化双胞胎是唯一可以消除全面测试巨大成本的解决方案。但是为了实现这一目标，数字化双胞胎需要具备完整的预测能力，涵盖所有涉及的物理模型。核能许可流程的独特挑战意味着，我们对相关物理流程及其在数字化双胞胎中的表示的了解程度必须远远超出在其他行业的应用。

与其他行业不同的是，我们无法回过头来使用实物模型来测试我们的概念。例如，在新客机的许可阶段，您可以使用数字化双胞胎技术完成对机翼结构性能的所有设计，但最终，许可颁发机构会对这些机翼进行持续测试，直到其断裂为止。但可以合理想像的是，没有人愿意对完整的核反应堆进行持续试验，直到其销毁为止。因此，我们更迫切需要高保真的数字化双胞胎技术。

如果能够交付高保真的数字化双胞胎或虚拟反应堆，那么，我们就能将设计周期缩短十年甚至更多，同时大幅降低调试成本。

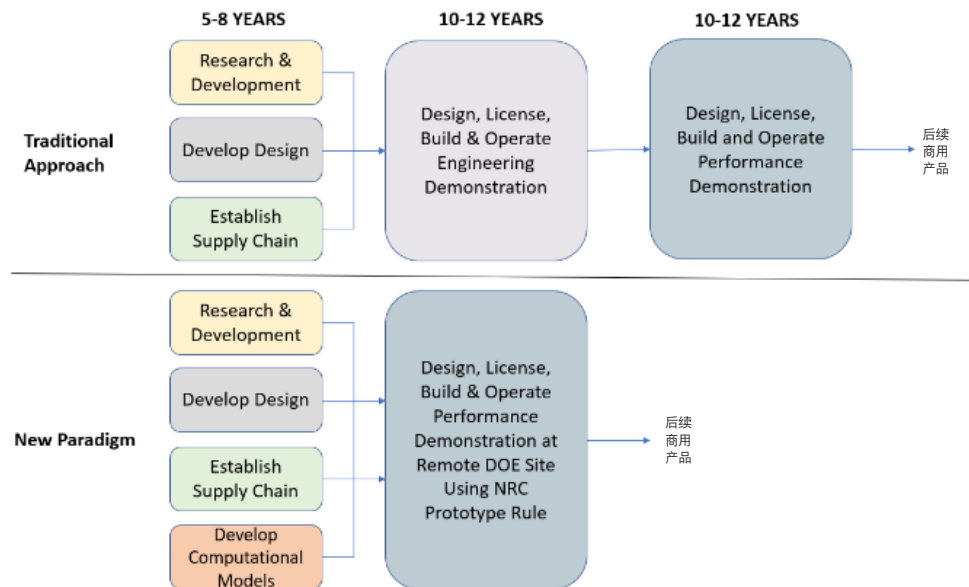


图 3. 麻省理工学院提出一种全新范例，采用数字化双胞胎技术取代工程用示范堆，从而缩短 10 - 12 年的调试时间。

数字化双胞胎付诸应用：新型冷却剂

在下面由 X-Energy 公司提供的插图中，您可以看到他们已使用 Simcenter™ STAR-CCM+™ 软件(属于 Xcelerator™ 产品组合，是 Siemens Digital Industries Software 推出的全面集成式软件和服务组合)虚拟设计了众多组件。X-Energy 反应堆的最大优点是其强大的安全性能。它采用较低的功率密度与堆芯中的大量石墨相结合，意味着即使在发生事故(例如冷却剂丢失)的情况下，系统仍具有较高的热惯性。但是，人们担心球床中“热点”的存在可能会对卵石和燃料的完整性产生不良影响。

在设计阶段，非常难能可贵的是，X-Energy 能够同时预测流体和固体中的温度，包括所有传热模式的影响：传导、对流和辐射。

采用传统的单维网络技术，根本不可能优化所有这些组件，因为这些组件的温度具有太大的不确定性，完全无法满足许可颁发机构的要求(如果缺乏足够的安全性，反应堆的财务可行性将会大打折扣)。

为了满足许可要求，X-energy 和 Kairos Power(也使用球床反应堆)必须证明它们能够准确预测成千上万个单体燃料球的温度，而这些球并非静态而是在反应堆中来回移

动直至能量耗尽(最终从反应堆排出)。这意味着每颗卵石的燃烧寿命会随其在反应堆中的位置而异。由于每颗卵石的能量具有很多不确定性，因此，如何准确预测其温度以及最终如何对其冷却也同样存在很多不确定性。

消除这些不确定性的唯一方法(替代建造昂贵的全尺寸示范堆)是使用高保真三维双胞胎(如下图所示)，它可以详细解析每颗卵石，让我们了解每颗卵石在堆芯中的温度变化情况；这样的预测精度即使在实际的实验示范堆中也几乎是不可能的。

然而，提供准确和数字化的卵石模型也是一项艰巨挑战。我们开始与荷兰核研究与咨询集团(NRG)合作，首先建立了球床的超高保真模拟，然后将其作为测试床用以验证其他更实用、可在数字化双胞胎中部署的低阶模型。

在下图中，您看到的是理想化的简易卵石结构，作为初始的概念验证点。然后，我们移入尺寸有限的随机床，最后移至包括壁效应的完全随机床。对于每种情况，我们都建立了高保真度的准直接数值模拟，然后将其用于验证可在反应堆设计期间放心部署的低保真度模型(在本例中为计算成本极低的混合型雷诺时均(RANS)模拟)。

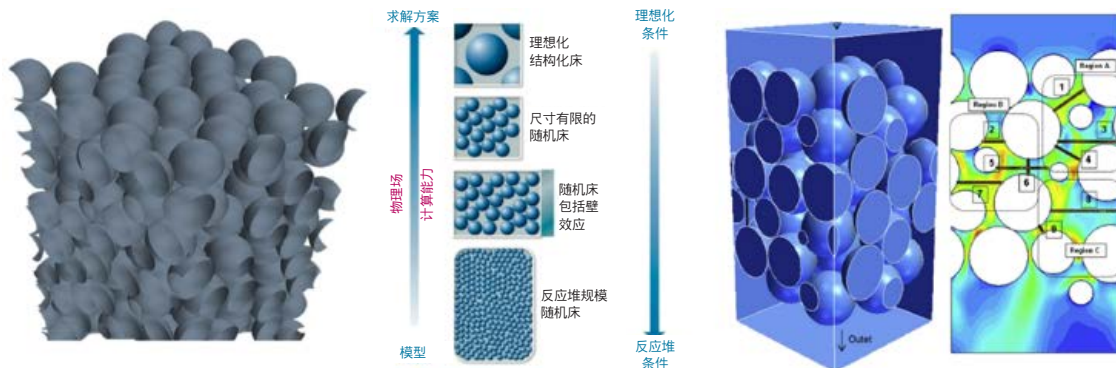


图 4. 球床反应堆建模的演变。

对于球床反应堆的设计人员来说，这是一个很好的起点。您了解行业内的最新技术，但又拥有一系列可作为自适应数字化双胞胎模型进行部署的低保真度工具。您还了解这些模型所需的时间和计算成本，同时又拥有可用于扩展模型以体现实际反应堆特性的相关数据。最重要的是，您拥有相关验证数据（由庞大的同行社区汇编），可以满足监管部门对模型准确性以及反应堆安全性的要求。

所有这些都可以通过微小的成本（相较于全尺寸示范堆）获得，且示范堆所能提供的信息远少于数字化双胞胎系统。

数字化双胞胎付诸应用：热震荡

欧洲流行的液态金属冷却反应堆是许多第四代反应堆设计的基础。例如比利时的 MYRRHA 反应堆、美国的 TerraPower 和瑞典的 LeadCold 等。液态金属是出色的冷却剂，但再一次带来了与高温运行相关的新的热工水力挑战。

其中一个问题是“热震荡”，即液态金属冷热混合不完全的结果。这引起了人们对反应堆上部结构的担心，因为在这里，剥离会加速热疲劳、热分层以及因流体结构相互作用而引起的振荡。与上例中的球床一样，我们与 NRG 合作开发了验证示例所需的准直接数值数据库。

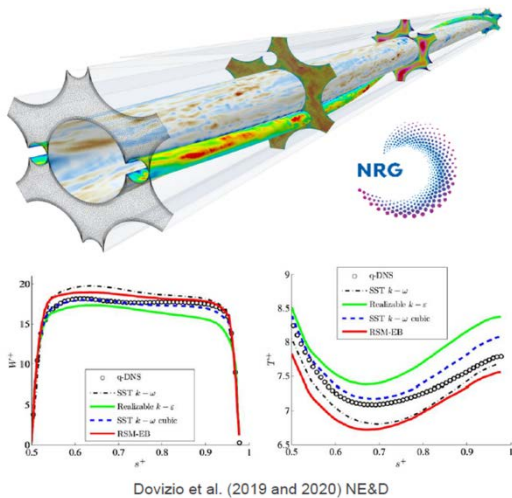


图 5. 绕丝包覆燃料棒束模拟（Shams 等）。

在下面的图片中，您可以看到 NRG 的 Afaque Shams 团队对包覆燃料棒束中的流动情况进行直接数值模拟的示意图。⁵ 这些模拟表明，我们可以解析绕丝的细节以及计算网格的细节，并预测棒束周围的温度局部分布（而这在 15 或 20 年前是不可能做到的）。

借助准 DNS 结果的数据库（显式表示湍流而非对其建模），我们能够验证低保真 RANS 方法，从而在数字化双胞胎环境中实际部署。

NRG 还证明了非线性 SST k- ω 模型能够足够准确地预测局部温度分布。这里的关键是该模型的非线性版本可以捕获湍流的熵产行为，该行为可直接影响温度、速度和湍流的分布。此类信息对于核反应堆（或其数字化双胞胎）的设计人员非常有用，因为它省却了长达数月的工具验证工作。

借助有效的湍流模型，我们还可以模拟流体结构的相互作用，并预测燃料组件因热流动和热效应（特别是热震荡）而产生的运动情况。这对于 TerraPower 概念之类的设计尤为重要，因为燃料将伴随反应堆度过其整个使用寿命，并且会因辐射和热效应而发生变形。使用 Simcenter STAR-CCM+, NRG 可以预测燃料棒束中 0.2% 以内的波动，⁶ 从而真正了解核电站在整个生命周期中的疲劳风险。

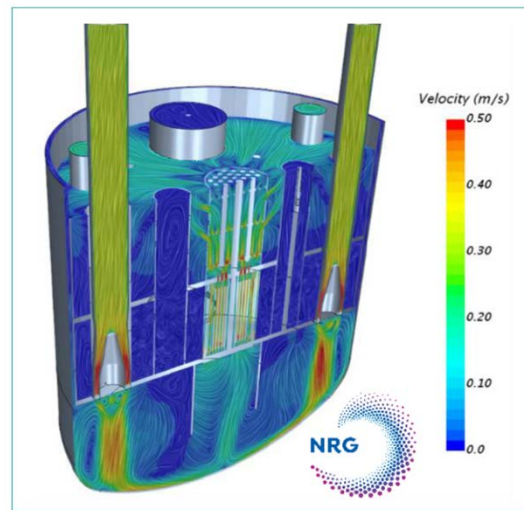


图 6. 使用 Simcenter STAR-CCM+ 在 ESCAPE 实验中进行的热分层模拟。

这里一个不变的主题是，我们可以使用复杂物理场的高保真模型来验证计算成本较低且可作为数字化双胞胎实际模型使用的低阶模型。我们很早就发现液态金属的混合方式混乱且难以预测，特别是使用标准的雷诺时均湍流模型无法准确预测用于控制液态金属冷却剂混合的流结构。因此，我们一直在开发可以产生大型的涡流模拟 (LES) 类型结果且又计算成本极低的混合模型。

这些所谓的第二代非稳态雷诺时均 (URANS) 湍流模型可以预测这些温度分布，相比 LES 方法可节省将近两个数量级的成本。例如，我们可以将求解速度提高 50 倍，而结果的准确性几乎相同。在 NRG 提供的最新验证研究中，我们能够预测整个反应堆的热分布，包括实际反应堆中的热震荡和热分层效应，且无需进行任何调整。

所有这些都可以通过微小的成本（相较于全尺寸示范堆）获得，且示范堆所能提供的信息远少于数字化双胞胎系统。

结论

数字化双胞胎技术（一种能够在设计、许可和运行阶段预测核反应堆性能的功能性虚拟模型）是及时交付下一代核反应堆、拯救地球、远离气候极端变化影响的前提条件。尽管在开发能够体现反应堆各方面性能的物理模型方面仍有大量工作要做，但与比当前行业普遍采用的建造昂贵示范堆方法相比，这些模型的开发成本要降低多个数量级。

参考信息

1. “核能在碳约束世界中的未来” (*The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*)，麻省理工学院，2018 年。
2. “美国能源部宣布投资 3500 万美元，开发用于改善先进核反应堆运行和维护的工具” (*Department of Energy Announces \$35 Million To Develop Tools to Transform Operations and Maintenance of Advanced Nuclear Reactors*)，美国能源部新闻稿，2019 年。
3. “转型挑战反应堆示范计划 (*Transformational Challenge Reactor Demonstration Program*)”，美国橡树岭国家实验室概况，2019 年。
4. 橡树岭国家实验室主任 Thomas Zacharia 在美国参议院拨款委员会能源和水资源开发小组听证会上的证词，2019 年 1 月。
5. Shams 等。“无限绕丝包覆燃料组件的高保真数值模拟 (*High fidelity numerical simulations of an infinite wire-wrapped fuel assembly*)”，核工程与设计期刊，第 335 卷，2018 年。
6. Shams 等。“由轴向湍流引起的杆组件振动的数值模拟 (*Numerical simulations of rod assembly vibration induced by turbulent axial flows*)”，核工程与设计期刊，第 335 卷，2018 年。

Siemens Digital Industries Software

总部

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

美洲

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

欧洲

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

亚太地区

Unit 901-902, 9/F
Tower B, Manulife Financial Centre
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong
Kowloon, Hong Kong
+852 2230 3333

关于 Siemens Digital Industries Software

Siemens Digital Industries Software 不断推动数字化企业转型，让工程、制造业和电子设计遇见未来。Xcelerator 产品组合助力各种规模的企业打造数字化双胞胎，带来新的洞察、新的改进机遇和新的自动化水平，让技术创新如虎添翼。如需了解有关 Siemens Digital Industries Software 产品和服务的详细信息，请访问 [siemens.com/software](https://www.siemens.com/software) 或关注我们的[领英](#)、[推特](#)、[脸书](#)和[照片墙](#)帐号。Siemens Digital Industries Software – 数智今日，同塑未来

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2020 Siemens. 可在[此处](#)查看相关西门子商标列表。其他商标属于其各自持有方。
82369-82788-C3-ZH 11/20 LOC