

Construction Method of Physical Field Digital Twin Model of Power Generation Equipment Based on Dynamic Degradation of Data

Weiping Song

Harbin Electric Science and Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150000, China

Abstract

This paper presents a data-driven dynamic dimensionality reduction method for constructing physical field-level digital twin models. First, it elucidates the core value of model dimensionality reduction under the digital twin paradigm and analyzes the limitations of traditional simulation technologies in cross-domain and lifecycle reuse. Second, it highlights the pivotal role of model dimensionality reduction in breaking down simulation barriers and enabling knowledge reuse, focusing on two dimensions: cross-platform interaction between 3D simulation and system simulation, and model migration between design and operational phases. The paper then details the technical principles of model dimensionality reduction, including its two-phase (offline-online) computational architecture, mainstream dimensionality reduction methods, and research progress in nonlinear scenarios. Finally, it summarizes the core advantages of model dimensionality reduction in enhancing interactivity, reliability, continuity, accessibility, and distributability.

Keywords

digital twin; model reduction; lifecycle reuse; power generation equipment; real-time simulation

基于数据动态降阶的发电设备物理场级数字孪生模型构建方法

宋为平

哈尔滨电气科学技术有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150000

摘要

本文提出一种基于数据动态降阶的物理场级数字孪生模型构建方法。首先阐述数字孪生范式下模型降阶的核心价值, 分析传统仿真技术在跨领域、跨生命周期复用中的瓶颈; 其次, 从三维仿真与系统仿真的跨平台交互、设计阶段与运行阶段的模型迁移两个维度, 揭示模型降阶技术在打破仿真壁垒、实现知识复用中的关键作用; 进而详细介绍模型降阶的技术原理, 包括离线-在线两阶段计算架构、主流降维方法及非线性场景的研究现状; 最后总结模型降阶在交互性、可靠性、连续性、可访问性与可分布性方面的核心优势。

关键词

数字孪生; 模型降阶; 跨生命周期复用; 发电设备; 实时仿真

1 引言

在数字化浪潮的推动下, 颠覆性创新正以深远的经济与社会影响力重塑产业形态, 而仿真技术作为数字化转型的核心支撑, 通过数字孪生实现了物理实体与数字空间的精准镜像映射。数字孪生的本质是一场范式革命——它打破了传统专业割裂的工具应用模式, 构建了通过后台仿真与物理、数字环境持续交互的自主辅助系统, 为全生命周期决策提供智能化支撑^[1]。模型降阶技术作为数字孪生的核心基石, 通过大幅削减模型自由度, 在保证精度与可预测性的前提下

提升计算效率, 同时解决了仿真模型跨场景复用与知识产权保护的关键难题, 尤其实现了产品设计阶段仿真模型在运行阶段的高效复用, 为数字孪生的工程化落地提供了核心技术路径。

当前, 复杂产品与系统的工程研发及运维正面临双重挑战: 一方面, 系统集成复杂度持续提升(如异构宏观系统融合、新型制造技术应用), 业务端对创新迭代速度的要求不断提高, 催生了对高性能模型化软件工具的迫切需求; 另一方面, 专业人才储备的局限性制约了基于模型的方法规模化应用。在此背景下, 数字孪生已成为引领产业数字化转型的核心战略技术趋势, 其核心价值在于整合产品全生命周期(从概念设计到报废处置)的可操作信息与数据, 通过嵌入

【作者简介】宋为平(1988-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备力学完整性分析相关的研究。

式智能为日常决策提供支持，最终实现系统可靠性、质量与效率的协同提升。

传统仿真技术多应用于产品研发早期的设计规划与尺寸优化，而数字孪生要求仿真贯穿全生命周期——不仅为研发阶段的工程师提供设计验证支持，更要为运维阶段的操作人员提供状态监测、优化控制与预测性维护服务。这一转变需要将动态软件模型深度集成至现有仿真 workflow，实现专业工程知识的结构化存储与高效复用，使非专业人员及生命周期各阶段均可共享核心技术沉淀，其技术逻辑如图 1 所示。

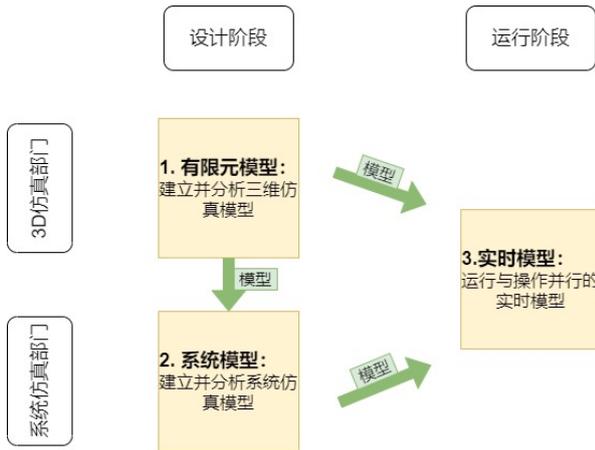


图 1 数字孪生中的模型转换

2 从三维仿真到系统仿真的模型交换

仿真技术已在各工程领域实现规模化应用，但传统仿真多采用“Silo”格式（即通过专用 API 函数库读写二进制科学数据），导致模型难以跨领域复用，成为制约基于模型的系统工程（MBSE）推广的核心瓶颈^[2]。MBSE 的核心思想是通过数字系统模型捕获所有子系统的互联行为，以虚拟专业模型与系统模型为基础，通过增量式、连续性适配模型模拟虚拟测试场景，实现系统需求、功能与行为的早期关联验证。

MBSE 将仿真划分为两个核心层次：

系统仿真：聚焦核心行为模拟（如基于 Mworks、

Matlab 平台），涵盖软件、控制等多学科领域，是系统级解决方案的核心研究工具；

专业特定建模与仿真：基于三维几何或计算机辅助工程（CAE）工具（如西门子 Simcenter、Comsol、ANSYS 多物理场）构建高复杂度、高精度模型，用于专业领域的详细验证与优化。

当前工业实践中，三维仿真与系统仿真部门存在明显割裂——各部门依赖专属商业或自研工具构建模型，当三维仿真模型完成校准后，需手动提取核心信息并重建为系统仿真模型，效率低下且易引入人为误差。模型降阶技术的出现恰好解决了这一痛点：结合供应商中立的功能模型接口（FMI）标准（已在 100 余种工具中实现兼容）[3]，模型降阶算法可直接以详细三维仿真模型为输入，自动生成标准化格式的压缩模型，为系统仿真软件提供高效可用的组件模型。这一过程不仅实现了模型的跨平台转移，更推动了模型交换的全流程自动化，其技术架构如图 2 所示。

3 从设计阶段到运行阶段的模型交换

随着计算能力的提升与数学算法的迭代，计算机辅助技术已成为运维阶段的核心支撑手段。相较于传统方法，计算机辅助方案展现出更优的成本效益比——例如，通过先进控制算法提升卡车能源效率的投入产出比，显著优于空气动力学优化措施。

在工业运维场景中，数据驱动方法与模型预测方法各有优劣：机器学习方法通过挖掘传感器数据规律替代传统启发式规则，但受限于数据可用性（如客户数据含知识产权、特殊故障数据稀缺）^[4]；模型预测方法可有效提升运维决策的前瞻性，但要求仿真模型具备超实时计算能力，而产品设计阶段的仿真模型通常计算成本高昂，难以直接应用于运维场景，导致其仅能在高价值或大批量应用中推广。模型降阶技术可对大规模三维仿真模型进行高效压缩，生成的降阶模型能够实现超实时评估（如图 3 所示），既解决了数据驱动方法的样本依赖问题，又避免了运维阶段重新构建模型的资源消耗，为故障预测、效率优化与业务规划等新型运维服务提供了可行路径。

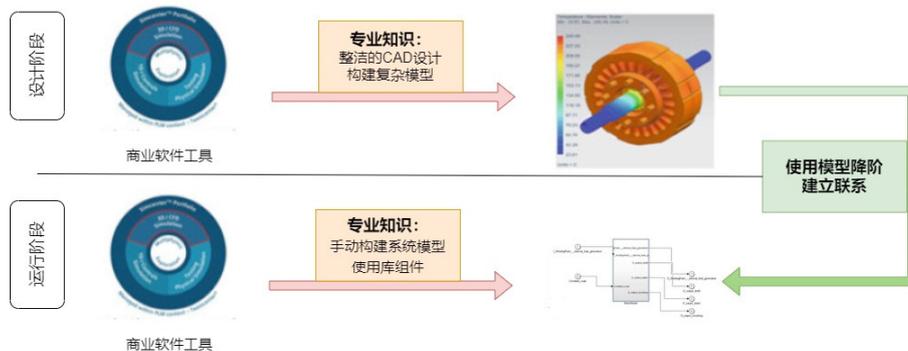


图 2 从三维仿真到系统仿真的模型交换

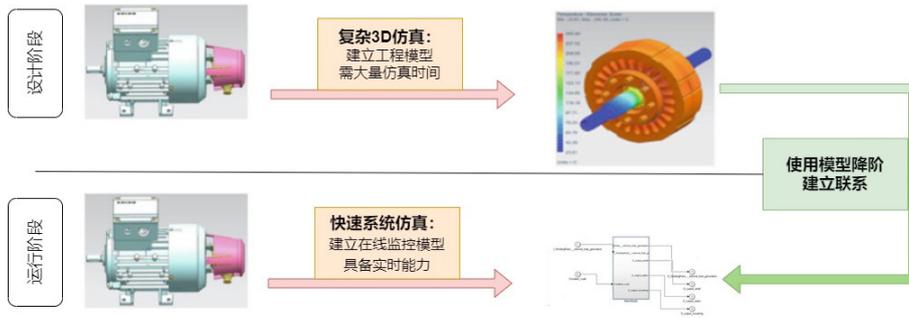


图 3 从设计阶段到运行阶段的模型交换

4 模型降阶核心技术

数字孪生的核心特征是持续背景仿真，而模型降阶是实现这一特征的关键数学技术。在工程设计中，三维偏微分方程的数值求解是核心手段，经空间离散化后会形成百万级未知量的大型线性稀疏方程组，直接导致实时仿真难以实现。模型降阶技术通过将计算过程拆分为离线阶段与在线阶段，将大量计算负荷转移至离线阶段（如基函数构建、数据预处理），在线阶段仅需通过低维模型快速求解，从而实现交互式与实时仿真 [5]。

过去数十年间，模型降阶技术已形成多种成熟方法，主流包括本征正交分解、平衡截断、缩减基法与 Krylov 子空间方法等，其核心思想均是通过构建低维基函数空间，实现高维问题的降维求解。对于（近）线性模型，模型降阶技术已发展为计算工程与科学领域的成熟技术；而针对非线性模型的高效降阶方法，目前仍是学术研究与工程应用的热点方向。模型降阶技术在产品生命周期仿真链中的突破性价值如图 4 所示。

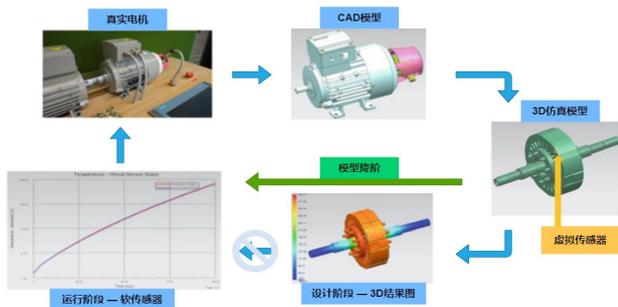


图 4 产品生命周期仿真链中的模型降阶（绿）超越目前的方法（蓝）

5 结语

模型降阶技术作为数字孪生全生命周期落地的核心数学支撑，将仿真模型的交互性、可靠性、连续性、可访问性与可分布性提升至新高度，其核心优势体现在：

交互性：相较于依赖硬件架构优化或求解技术改进的

传统加速方法，模型降阶直接削减自由度，可快速生成适配不同场景的模型；针对实时应用需求，可通过自适应方法实现精度与速度的动态平衡；

可靠性：多数模型降阶方案具备完善的误差分析机制，能够量化简化模型与原模型的精度差异，结合数据校准技术可提供误差范围与置信区间，解决了传统加速方法精度衰减不可控的问题；

连续性：模型降阶技术实现了设计阶段高精度模型向运维阶段快速模型的自动化转化，打破了生命周期各阶段的模型壁垒，避免了重复建模的资源浪费，构建了无缝衔接的仿真 workflow；

可访问性：通过标准化格式封装，模型降阶生成的快速模型可被非专业人员直接集成至系统仿真，降低了专业知识的复用门槛，是数字孪生技术规模化推广的关键支撑；

可分布性：降阶模型的求解仅需矩阵向量乘法运算，可在嵌入式设备等小型计算平台运行，无需依赖专用工作站；同时，降阶模型无法反向重建原始 CAD/CAE 模型，有效保护了知识产权，为模型的跨企业、跨区域共享提供了安全保障，推动了“部件 + 数字孪生”一体化交付模式的落地。

未来，随着非线性模型降阶技术、动态自适应降阶方法的持续突破，模型降阶将进一步提升数字孪生模型的实时性与鲁棒性，为发电设备等复杂工业系统的全生命周期智能化运维提供更强大的技术支撑，助力产业数字化转型向纵深发展。

参考文献

- [1] 王青山, 严波, 陈岩, 等. 基于降阶模型和数据驱动的动态结构数字孪生方法 [J]. 应用数学和力学, 2023, 44 (7):757 - 768.
- [2] 仝小冬, 鲍劲松, 陶飞. 协同进化的数字孪生 —— 数字工程的多维动态方法 [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024,
- [3] 佚名. 大型发电机端部绕组电磁力物理数字孪生建模 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0633>.
- [4] 李琦, 张霖, 陶飞. 数字孪生模型的复用与演化机制研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (5):1421 - 1433.
- [5] 赵星海, 刘畅, 王鹏. 发电设备多物理场耦合仿真的模型降阶技术应用 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (18):6198 - 6208.