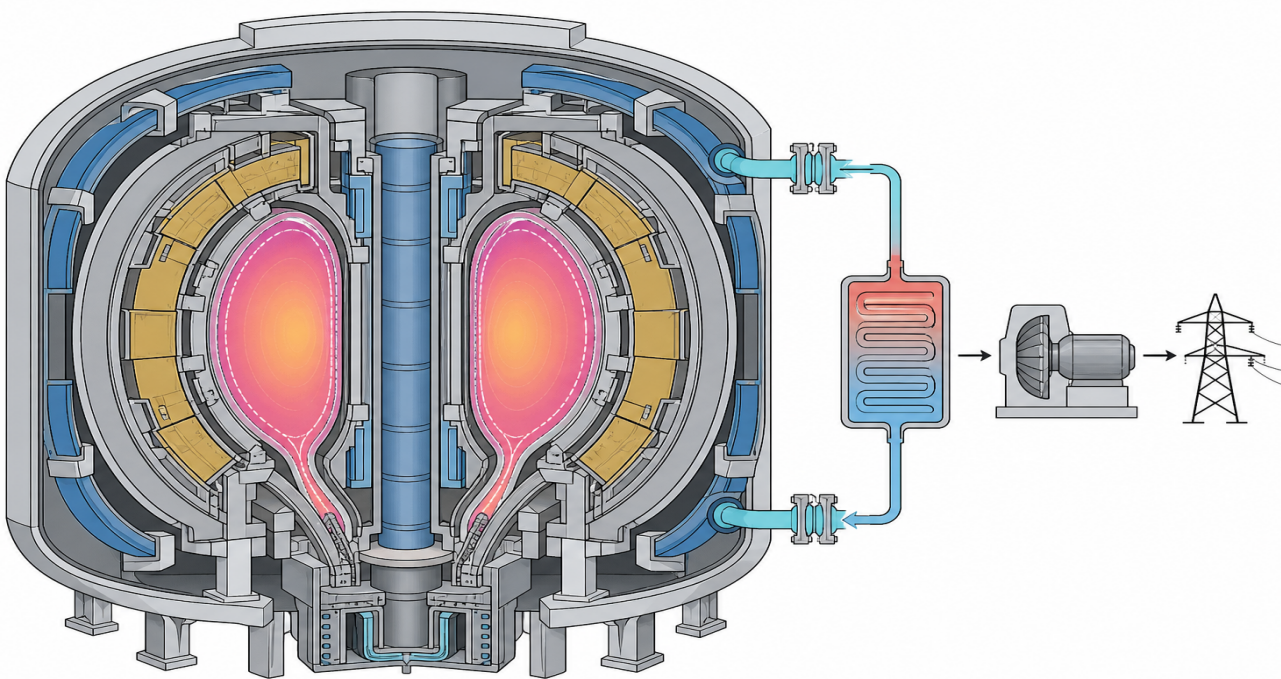




聚变数字孪生中的 物理模拟

从 DINA / MEQ 控制服务到聚变电厂级可信预测

研究与路线规划版

3 万字级详实报告

2026-08 证据截止

面向数字孪生负责人、系统工程师、控制/软件/AI 团队及聚变物理合作专家。本报告区分公开事实、闭源工具公开证据与工程推断；生成图仅用于解释，不替代工程设计或安全分析。

目录

目录	2
执行摘要	5
1. 阅读方法、范围与证据边界	6
2. 从零开始理解聚变与模拟	7
3. 从装置、聚变堆到电厂：需求目标分解	8
4. 模型体系：多保真、耦合与“可信度预算”	10
5. 平衡、重建、控制：DINA 与 MEQ 的战略切入	12
5.1 问题边界	12
5.2 同类代码与适用范围	12
5.3 建议的 DINA/MEQ 服务架构	13
6. 核心输运、源项、快离子与场景集成	13
6.1 集成输运的角色	13
6.2 湍流和新经典代码	14
6.3 加热、电流驱动和快离子	14
7. MHD、破裂和失控电子	14
7.1 从线性边界到非线性事件	15
7.2 DREAM 与失控电子链	15
8. 边界、偏滤器、等离子体—壁相互作用	15
9. 仿星器与其他构型	15
10. 中子学、包层、氦、材料与工程多物理	16
10.1 中子与活化	16
10.2 氦增殖与迁移	16
10.3 热流体、结构与液态金属 MHD	16
11. 系统代码、整厂设计与数字线程	17
11A. 集成模拟专题：框架全景、能力边界与数字孪生差距	18
11A.1 为什么需要把“集成模拟”单独讲清楚	19
11A.2 评价框架：不能只问“能接多少代码”	20
11A.3 数据模型与 workflow 基础设施	20
11A.4 脉冲与核心—边界集成模拟套件	21
11A.5 全装置高保真与工程多物理框架	23
11A.6 整厂设计集成框架	23
11A.7 商业和通用工业平台：不可忽略，但不能替代聚变物理	24
11A.8 各类框架的综合优缺点与最终目标差距	25
11A.9 耦合方式的优缺点：集成的主要风险往往藏在接口	26
11A.10 集成模拟距离数字孪生具体欠缺什么	27

11A.11 推荐的目标架构：在线运行环与离线证据工厂	29
11A.12 对本项目的分阶段路线：从 DINA/MEQ 到整厂集成孪生	29
11A.13 建议的框架组合，而不是单一平台押注	30
11A.14 本章结论	30
11A.15 专题参考来源	30
12. 各装置如何使用这些工具	32
12.1 ITER	32
12.2 JET 与 EUROfusion	32
12.3 TCV	32
12.4 DIII-D、SPARC 与私营装置	32
12.5 JT-60SA、KSTAR、AUG、EAST 与中国装置	32
12.6 W7-X 与仿星器	32
13. 实验、工程与模拟如何协同	33
13.1 实验设计与合成诊断	33
13.2 工程协同	33
13.3 数据与软件工程	33
14. 验证、确认、不确定度与模型可信度	34
15. AI、代理模型与在线数字孪生	35
16. 整体技术路线：从控制服务到整厂孪生	35
阶段 0：共同语言与基线（0—3 个月）	35
阶段 1：可信控制模拟服务（3—18 个月）	36
阶段 2：等离子体预测孪生（18—36 个月）	36
阶段 3：聚变堆多物理孪生（3—5 年）	36
阶段 4：聚变电厂全生命周期孪生（5—8 年及以后）	36
16.1 目标架构	36
16.2 优先级与投资组合	37
16.3 团队与治理	37
17. 与领域专家讨论的议题清单	37
18. 结论与近期十二项行动	37
附录 A：主要代码与工具分类索引	38
附录 B：术语速查	38
参考文献（核心）	39
附录 C：代码选型、复杂度与应用效果详表	39
C.1 如何理解“应用效果”	39
C.2 平衡与控制工具比较	39
C.3 集成输运工具比较	40
C.4 湍流与新经典工具比较	40

C.5 MHD、边界与破裂工具比较	40
C.6 中子、氦与工程工具比较	40
C.7 系统平台与工作流比较	41
C.8 推荐的实际选型试验	41
原始论文图补充	42

技术报告（研究与路线规划版） 证据检索截止：2026 年 8 月 9 日 | 适用对象：数字孪生负责人、系统工程师、控制/软件/AI 团队及聚变物理合作专家

本报告的核心结论：聚变数字孪生不应被定义成一个“复刻整台装置的超级模型”，而应被定义成围绕决策组织的、可验证的多保真模型组合。高保真模型解释机理和提供外推边界，快速模型负责估计、预测与控制，实验与工程数据持续证伪和校准，统一数据本体与证据账本保证每个结论可追溯。

执行摘要

聚变装置首先是一个受强约束的动态实验系统：等离子体在真空室内由磁场约束，被加热系统、加料系统和线圈系统驱动，又被不稳定性、杂质、壁材料和保护系统限制。聚变堆在此基础上增加中子增殖、氚循环、核热、屏蔽、远程维护和安全边界；聚变电厂再增加蒸汽或其他能量转换回路、厂用电、可用率、检修计划、电网响应与经济性。三个层级的“模拟目标”不同：装置关心一次放电是否能安全完成与产生可解释数据；堆关心核部件在寿命周期内是否满足功能与安全裕量；电厂关心是否能长期、稳定、可维护并以可接受成本发电。

这意味着物理模拟不能按软件供应商或学科各自堆叠，而要从决策反推：谁在什么时间尺度上，依据哪些输入，要作出什么不可逆程度的决定？毫秒级闭环控制要求确定时限、鲁棒降级和严格配置管理；放电前场景设计允许分钟至小时计算，但要给出风险裕量；部件设计可使用千万核时级计算，却必须进行网格、模型形式和材料参数不确定度分析；许可和安全论证则要求保守性、独立复核与长期可重复性。把这些模型强行塞入同一“实时孪生”既不现实，也会混淆证据等级。

当前以 DINA、MEQ 切入是合理的。它们位于“装置—控制”接口：能够把等离子体平衡、电流演化、外部线圈、真空室导体、诊断和控制器放在同一个可操作的问题中。MEQ 在 TCV 语境下覆盖自由边界演化 FGE、平衡重建 LIUQE 和轨迹/场景工具 FBT；DINA 覆盖轴对称自由边界平衡、等离子体运输、外电路、被动结构和控制，并长期服务于 ITER、JT-60SA 等场景和控制研究。二者可形成数字孪生的“动态骨架”，但它们不自动给出湍流运输、三维 MHD、边界等离子体、快离子损失、中子学、氚迁移或部件疲劳的可信答案。

建议的路线不是“接入所有代码”，而是四次能力跃迁：第一阶段把 DINA/MEQ 做成可重复、可测试、可观测的控制模拟服务；第二阶段形成等离子体孪生，把快速运输、加热源项、边界/破裂风险和状态估计接入场景与控制；第三阶段形成聚变堆孪生，把中子学、包层、氚、热流体、结构、维护与安全约束加入统一场景账本；第四阶段形成电厂孪生，把系统设计、RAMI、成本、电网、资产和运行计划贯穿全生命周期。每阶段都必须设置“能力门”：只有当指定用途的验证、时延、稳定性、不确定度与治理要求同时满足，才允许进入下一类决策。

图解导读：八张图说明整理念

本版新增一组 Nature/Science 风格科学图版。图 A 把模型放在从毫秒到十年的决策时间轴上：实时性不是模型的附属指标，而是决定模型能否进入控制、场景、设计或运营决策的首要约束。图 B 进一步表明多保真体系的分工——高保真模型并不直接支配在线控制，而是通过数据库、约化模型和不确定度边界影响快速模型；实验残差则反向校准全部层级。

图 C 是物理接口矩阵。对角线表示同一物理域，深色非对角元素表示必须迭代的双向反馈，浅色元素表示载荷或边界条件传递。它提醒项目团队：数字孪生的复杂度主要来自接口与反馈，而不只是代码数量。优先解决核心运输—边界、边界—壁、核热—热流体—结构等强耦合链，比同时接入大量孤立求解器更有价值。

图 D 把实验、状态估计、预测、决策、合成诊断和证据账本画成闭环。中心不是“AI”或某个求解器，而是指定用途：同一个模型用于科研探索、控制建议或安全保护时，需要完全不同的时限、风险和证据门。图 E 则给出 DINA/MEQ 的演进方式：保留可审计求解器和装置资产包，通过统一数据与证据层接入快速运输、离线高保真证据工厂以及堆/电厂决策，而不是把全部方程硬塞进一个实时服务。

图 F 将模型可信度分为 G0—G5。软件能运行只达到最初级条件；只有经过软件正确性、数值验证、物理确认、目标场景盲预测与运行级影子/HIL/回退验证，模型才可以影响高后果决策。图 G 把项目路线变成四个由能力门连接的阶段，图 H 则给出贯穿实验资产、等离子体核心、边界、聚变堆工程、电厂系统和决策层的数字线程。八张图共同表达一个原则：统一的是配置、接口和证据，不是把所有物理方程统一成一个求解器。

1. 阅读方法、范围与证据边界

1.1 这份报告如何帮助非专业读者

初读时无需记住每个代码名。先建立三组坐标：空间尺度从电子和离子回旋半径到整厂；时间尺度从波与碰撞的皮秒/纳秒，到湍流和 MHD 的微秒/毫秒，再到放电、热循环、材料寿命和电厂财务的秒至数十年；决策尺度从实时控制到设计优化、运行维护和安全论证。每个代码只是某个坐标区域里的数值仪器，而不是现实本身。

报告采用五级证据语言。A 级为公开的实验验证、标准基准或多装置验证；B 级为跨代码验证、制造解、解析解、回归测试等强验证证据；C 级为在装置设计或放电分析中的公开应用；D 级为开发团队或机构公开说明但缺少足够方法细节；E 级为根据架构、文献和技术栈作出的工程推断。闭源代码并非天然不可信，开源代码也并非天然可信；关键是指定用途下证据是否足够、版本能否冻结、输入是否可追溯、误差是否影响决策。

“全部穷尽”在聚变模拟领域不能被理解为世界上不存在遗漏。大量代码是机构内部工具、历史分支、出口管制软件或论文原型，名称与能力也不断变化。本报告提供的是截至 2026 年 8 月、基于公开证据可核验的主流与代表性全景：覆盖磁约束聚变的主要学科链，补充惯性约束与替代构型概览；对闭源/受限工具只陈述公开可证实内容；对付费文献只保存书目信息、DOI 和合法入口，不绕过访问控制。

1.2 数字孪生不等于仿真，也不等于三维可视化

H 物理栈与数字线程

统一的是配置、接口和证据，而不是把全部方程塞进一个求解器



图 1 聚变物理栈与数字线程。作者绘制。

仿真是“给定模型和输入，计算输出”；数字孪生还要求与特定物理资产、配置和时刻对应，持续接收测量，能够比较预测与实际，并把偏差用于状态更新、模型选择或维护决策。三维可视化可以是人机界面，却不能代替模型证据。一个可信孪生至少包含：资产身份与配置基线、传感和诊断数据、模型及其适用域、数据同化/状态估计、预测和决策接口、验证与不确定度、运行监控、版本和权限治理。

“实时”也不是单一等级。硬实时控制要求最坏时延有上界；软实时监视允许偶发超时；准实时分析可能在一次放电后数秒至数分钟完成；离线设计可运行数小时或数周。高保真代码通常通过离线计算产生数据库、约化模型或边界条件，而不是直接进入等离子体控制系统。真正的体系结构应允许模型在不同时间尺度“错峰协作”。

2. 从零开始理解聚变与模拟

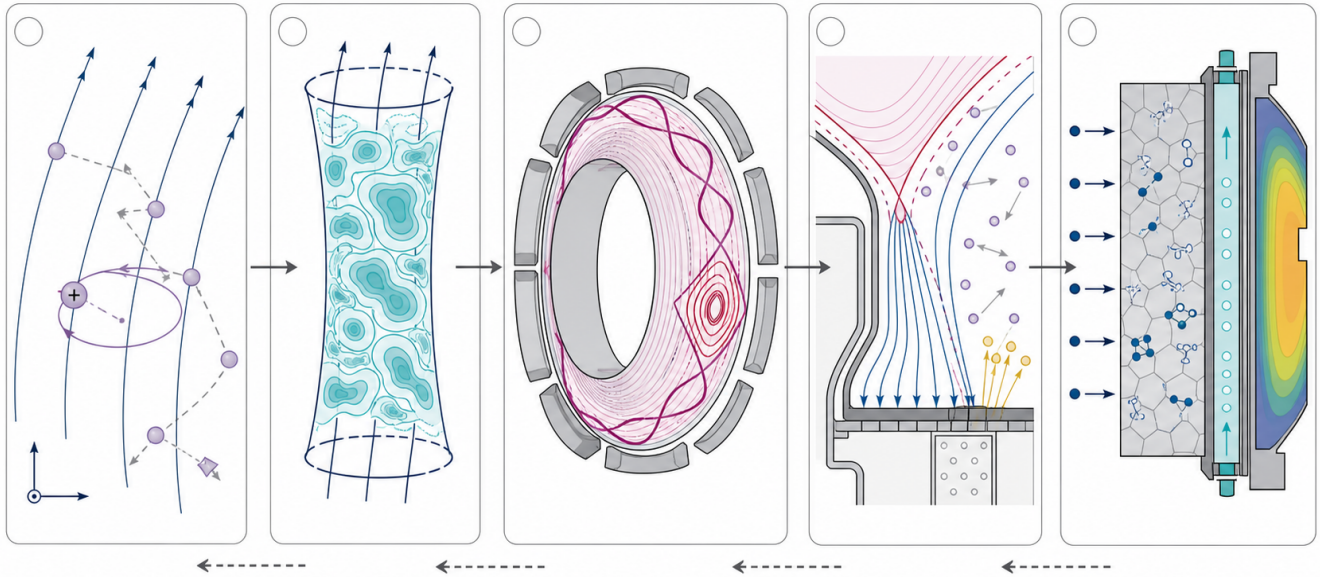


图 2 粒子回旋、湍流、MHD、边界与材料的多尺度链。imagenen 科学图版底图。

2.1 聚变反应与能量链

最接近工程应用的反应是氘—氚反应：氘核和氚核聚变生成一个约 3.5 MeV 的氦核（ α 粒子）和一个约 14.1 MeV 的中子。带电 α 粒子被磁场约束并加热等离子体；中子不受磁场约束，穿过第一壁，在包层中沉积热量、与含锂材料反应增殖氘，同时造成材料位移损伤和活化。电厂将核热传给冷却剂，再经换热、涡轮或其他转换系统发电。由此可见，等离子体功率并不等于上网电功率；还要扣除磁体低温、加热与电流驱动、泵、氦系统、厂房和控制系统的厂用电。

聚变“点火”或高增益只回答核心能量平衡的一部分。工程上还必须同时满足：热与粒子能被偏滤器排出，钨等面对等离子体材料不被过度侵蚀，氦库存可控，超导磁体不被中子和热负荷破坏，结构应力与疲劳满足寿命，故障可以被检测和缓解，维护停机时间可接受。物理模拟因此必须沿着“等离子体—壁—包层—冷却回路—发电—电网”传递功率、粒子、力和不确定度。

2.2 托卡马克为何需要控制

托卡马克用环向磁场和等离子体电流产生的极向磁场形成螺旋磁力线。理想情况下，带电粒子沿磁力线高速运动并在横向受到约束。真实等离子体具有压力梯度、碰撞、波、湍流和集体不稳定性；真空室和线圈又有有限电阻、电感、涡流与执行器时延。等离子体位置和形状稍有变化，就会改变磁诊断、壁间隙、加热沉积和稳定性裕量。因此控制系统需要在有限诊断条件下重建不可直接观测的平衡，再调节极向场线圈、加热、加料和杂质注入。

Grad-Shafranov 方程是在轴对称、力平衡假设下描述磁通与压力/电流分布的椭圆型方程。EFIT、LIUQE 等重建程序从磁探针、磁通环、线圈电流以及可能的动力学诊断反演平衡；FreeGS、TokaMaker、CREATE-NL、FIESTA、MEQ 的相关模块和 DINA 等可以做自由边界演化或设计。它们回答“等离子体在哪里、是什么形状、线圈需要怎样动作”，但结果依赖轴对称、参数化电流/压力、诊断质量和导体模型，不能把平衡误差误解成完整的物理误差。

2.3 为什么湍流如此重要

经典碰撞理论预测的横向输运通常不足以解释实验中的能量和粒子损失。微观尺度漂移波等不稳定性产生湍流涡旋，把热、粒子和动量跨磁面输运。GENE、CGYRO、GS2、GKW、stella、GX 等回旋动理学代码在四维相空间求解约化动力学方程，计算成本高，却能给出更接近第一性原理的通量与波动；TGLF、QualiKiz 等约化模型用更低成本近似这些结果，适合嵌入输运和预测 workflow。

“高保真”并不意味着无条件正确。湍流模拟需要选择电磁/静电、碰撞算子、物种、几何、边界和数值分辨率；实验诊断也有空间/时间卷积与反演误差。可信做法是先验证代码是否正确求解方程，再验证方程和参数在指定等离子体中是否足够，最后通过敏感性与不

确定度说明结论对网格、输入和模型选择的依赖。

2.4 MHD、破裂与安全边界

磁流体力学把等离子体近似成导电流体，适合描述比离子回旋尺度大得多的集体不稳定性。线性稳定代码能快速判断增长率和边界；非线性扩展 MHD 代码 JOEREK、M3D-C1、NIMROD、BOUT++ 等追踪 ELM、撕裂模、垂直位移事件、共振磁扰动和破裂演化。破裂会引起热淬灭、电流淬灭、电磁载荷和可能的失控电子束；DREAM、GO、NORSE 等进一步处理失控电子动力学。

对控制孪生而言，不能等待一次高保真三维破裂模拟。可行路径是让高保真代码形成风险指标、训练数据和极端场景库，再由经过约束的快速模型在实时系统中输出概率、提前量和建议动作。任何机器学习告警都要和事件定义、假阴性代价、分布漂移与安全回退绑定，而不能只汇报平均准确率。

2.5 边界、偏滤器与壁

磁力线在最后闭合磁面之外进入刮削层（SOL），并在偏滤器靶板终止。此区域负责排出热、氦灰和杂质，却同时承受极高热流、强中性粒子循环、鞘层、电离/复合和材料溅射。SOLPS-ITER、EDGE2D-EIRENE、UEDGE、SOLEEDGE3X-EIRENE、EMC3-EIRENE 等把等离子体流体与中性粒子输运耦合；GBS、TOKAM3X、GRILLIX、Hermes-3 等研究三维边界湍流；ERO2.0、GITR、DIVIMP 处理杂质和壁相互作用。

边界模型常是整机预测最薄弱的接口之一：上游湍流输运决定流入 SOL 的功率与粒子，偏滤器几何和中性粒子决定脱靶，壁侵蚀又将杂质反馈核心辐射。数值上存在网格、原子过程、输运系数和壁条件不确定性。数字孪生应保存接口通量及其置信区间，避免只交换一条“最佳估计”曲线。

2.6 中子、氦、材料和工程为何必须进入物理孪生

14 MeV 中子把等离子体问题变成核工程问题。OpenMC、MCNP、Serpent、TRIPOLI-4 配合 CAD/DAGMC 计算中子与光子输运、核热、剂量和响应；FISPACT-II、ALARA 处理活化与衰变。包层要增殖足够氦、带走热、屏蔽磁体并承受应力。FESTIM、TMAP8 等处理氦在材料中的扩散、俘获和释放；OpenFOAM、ANSYS、COMSOL、MOOSE/Cardinal、RELAP/MELCOR 类工具分析冷却、结构和事故瞬态。

这些模型的材料参数会随温度、辐照剂量和微结构变化，几何也随设计迭代改变。若 CAD、材料库、网格和工况没有共同配置基线，等离子体模型给出的壁载荷无法被工程模型可靠消费。数字线程要把“哪个几何版本、哪批材料数据、哪个脉冲谱、哪项近似”作为一等数据。

3. 从装置、聚变堆到电厂：需求目标分解

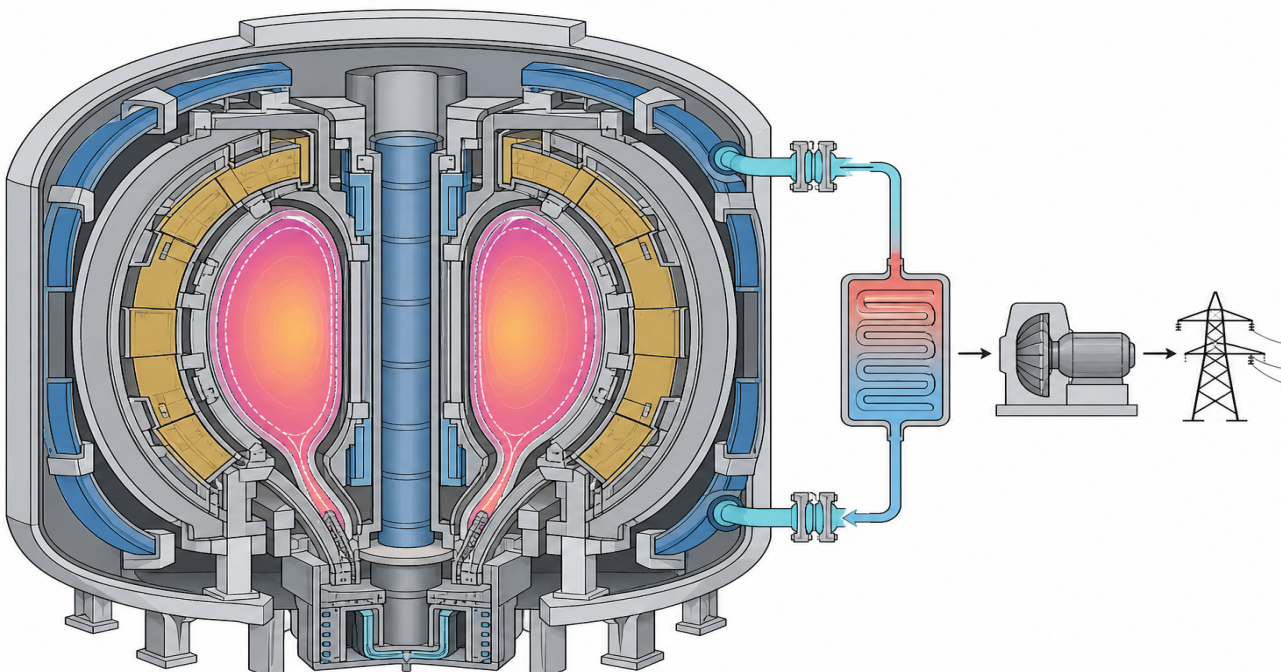


图 3 托卡马克、包层冷却与热电转换链科学剖面。imagegen 科学图版底图。

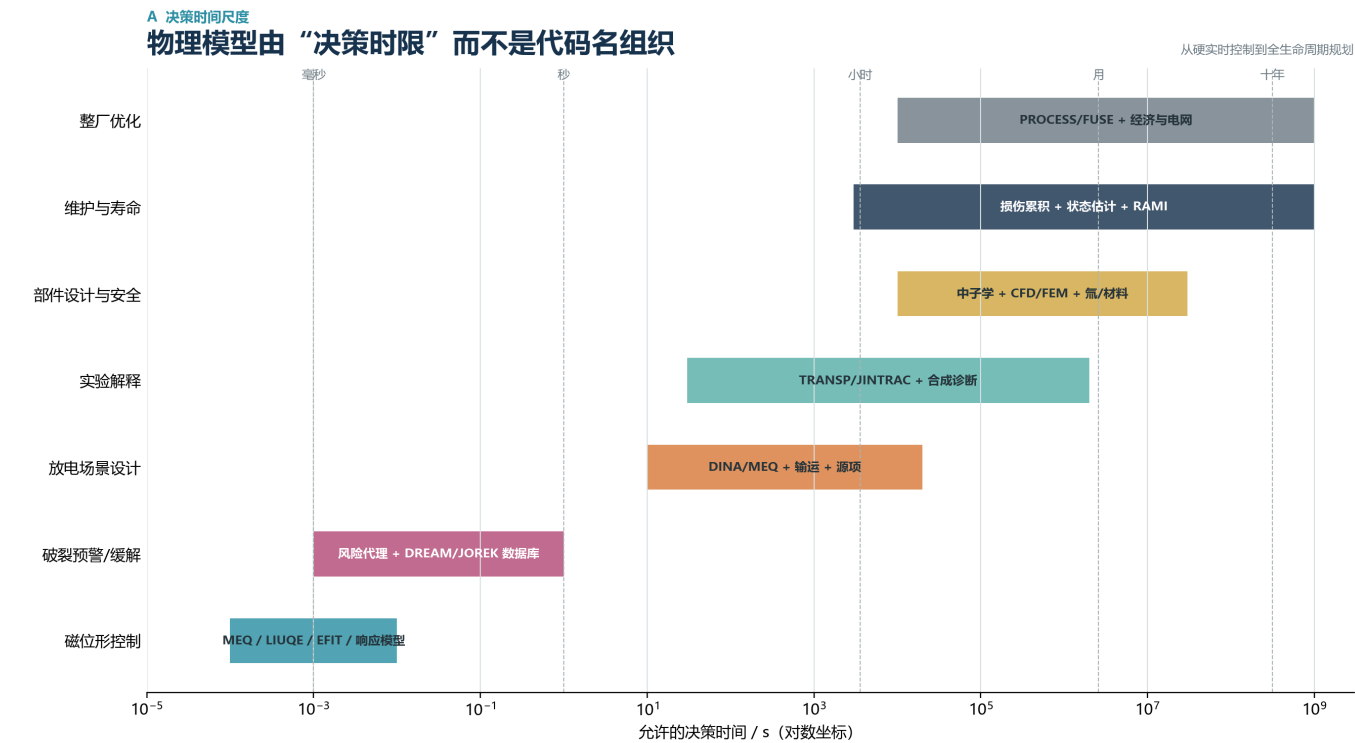


图 4 物理模型按决策时限组织。作者绘制。

3.1 聚变装置层：安全地做出可解释的放电

装置层的直接对象是一次放电及其准备、执行和复盘。放电前需要检查线圈电压/电流、磁通消耗、加热与加料时序、形状和壁间隙、稳定性、偏滤器热负荷及保护阈值。放电中需要快速重建状态、预测约束冲突、选择控制动作并在模型失配时安全降级。放电后需要对齐诊断、重建平衡、反演源项和输运、解释异常，并更新下一次计划。

相应的评价指标不是单一“预测误差”，而包括：最坏端到端时延、连续运行稳定性、初始化成功率、对缺失/坏诊断的鲁棒性、状态可观测性、约束违规提前量、校准度、放电回放一致性、模型与软件版本可复现性。控制算法在软件在环、处理器在环、硬件在环和影子运行中逐级验证，最终才进入有权限边界的闭环实验。

3.2 聚变堆层：把核部件与等离子体视为一个服役系统

聚变堆的目标由稳态或脉冲工况、核功率、氦自持、安全与部件寿命共同定义。所需模拟包括：中子通量/谱、核热与剂量、氦增殖比及其不确定度、磁体屏蔽、第一壁/偏滤器温度应力、冷却剂压降、液态金属 MHD、氦渗透与库存、辐照损伤、结构疲劳、远程维护剂量和故障后果。不同模型必须共享工况时间线，而非仅在名义满功率点交换数据。

反应堆级孪生应回答“剩余裕量和剩余寿命是多少”“下一种等离子体场景会怎样消耗部件寿命”“哪项诊断偏差会改变安全结论”“维修窗口和备件如何安排”。它需要连接等离子体控制和资产管理，但安全保护不应依赖未经许可的云端或不可解释模型。高后果决策需要保守包络、独立模型或实验、配置冻结和人机职责定义。

3.3 电厂层：把物理性能转化为可用率和经济性

电厂目标是净电功率、容量因子、可用率、成本、可维护性和法规符合性。PROCESS、FUSE、ARIES/SYCOMORE 类系统代码用 0D/1D 关系和约束快速探索设计空间；详细等离子体与工程模型用于校准其缩放关系和风险边界。电厂孪生还必须连接主热传输系统、能量转换、厂用电、氦工厂、低温、电网、库存、人员和维护计划。

对电厂而言，1% 的效率提升可能不如一次计划外停机重要。必须把模拟输出转换为 RAMI（可靠性、可用性、可维护性、可检查性）、成本与安全指标。系统模型应显式表示相关失效、共同原因故障、检修资源和供应链，而不是把所有不确定性折叠成一个“可用率系数”。

3.4 需求矩阵：输出、时延与证据

决策	典型时限	首要模型	必要证据	可接受的降级方式
等离子体位置/形状控制	0.1–1 ms 级循环	平衡重建、线性/非线性响应、执行器	实时回放、HIL、装置闭环、最坏时延	冻结/简化状态、保守参考、触发保护
放电场景设计	分钟—小时	DINA/MEQ、输运、源项、稳定性、边界	历史放电、跨代码、参数扫描	增大裕量、限制执行器和目标
破裂预警/缓解	毫秒—一秒	快速风险模型、MHD/失控电子数据库	事件级校准、漏报代价、分布漂移测试	保护触发和保守动作
部件设计	天—月	中子学、热流体、结构、氦、材料	网格/时间步收敛、基准实验、UQ、规范审查	保守载荷与材料包络
维护与寿命	小时—年	损伤累积、状态监测、RAMI	在役检查、历史数据、独立评估	提前检修、限功率运行
整厂优化	小时—月	系统代码、代理模型、多目标优化	约束闭合、敏感性、模型组合与专家评审	保留备选设计和风险准备金

4. 模型体系：多保真、耦合与“可信度预算”

4.1 四层模型栈

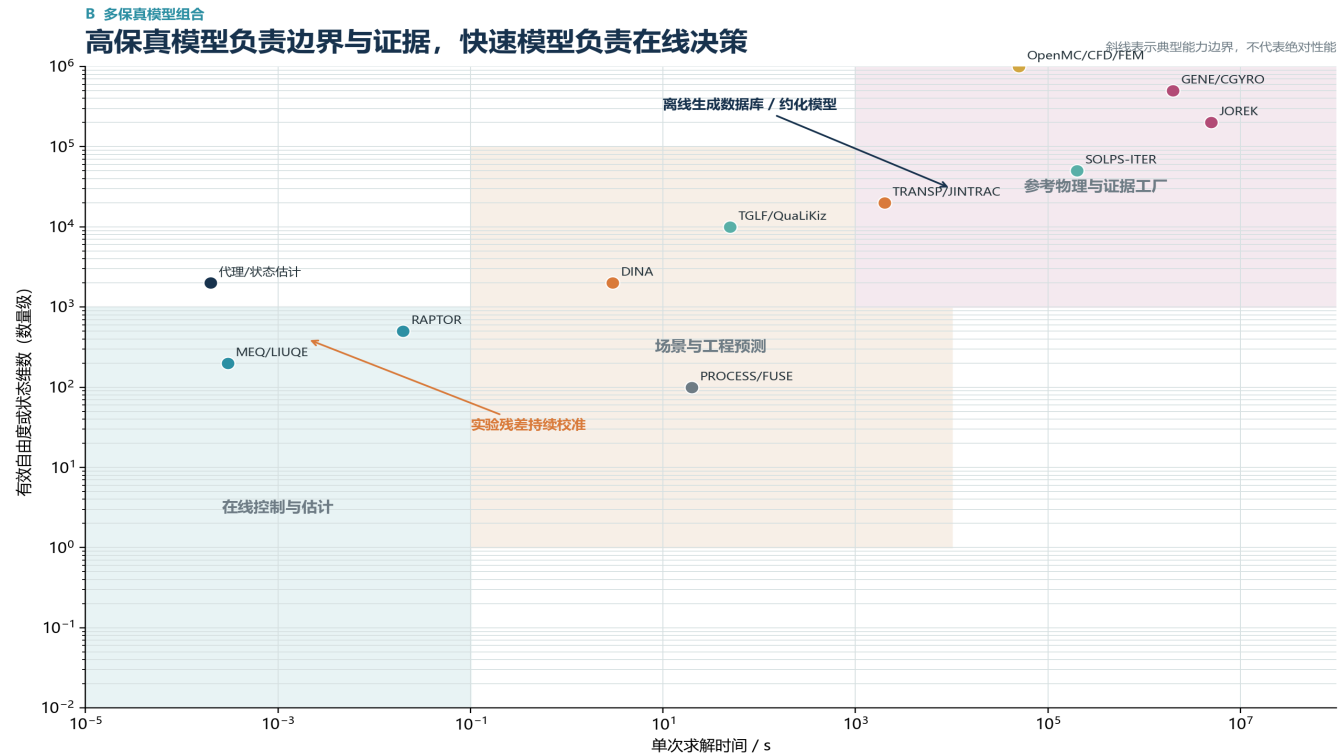


图 5 多保真模型的典型成本—状态维数分布；点位为数量级示意。作者绘制。

建议把模型按用途分为四层。第一层是参考物理：高保真回旋动理学、三维 MHD、蒙卡中子学、精细 CFD/FEM 等，运行昂贵，负责机理、极端场景和数据库。第二层是工程物理：1.5D 输运、二维边界、自由边界平衡、系统热工等，在精度和成本间折中，负责设计和场景。第三层是运行模型：状态空间、约化模型、响应矩阵、代理模型和故障模型，满足在线时延。第四层是决策模型：约束、风险、RAMI、成本和计划，把物理输出转换为可行动结论。

层与层之间不是简单替代。代理模型必须记录训练域、保真度来源、误差上界和外推检测；工程模型应保留与参考物理和实验的偏差；运行模型要有稳定回退。一个预测的总可信度受最弱接口控制：即使核心模型很精确，如果边界条件、几何版本或诊断反演不可靠，最终答案仍不可信。

4.2 耦合方式

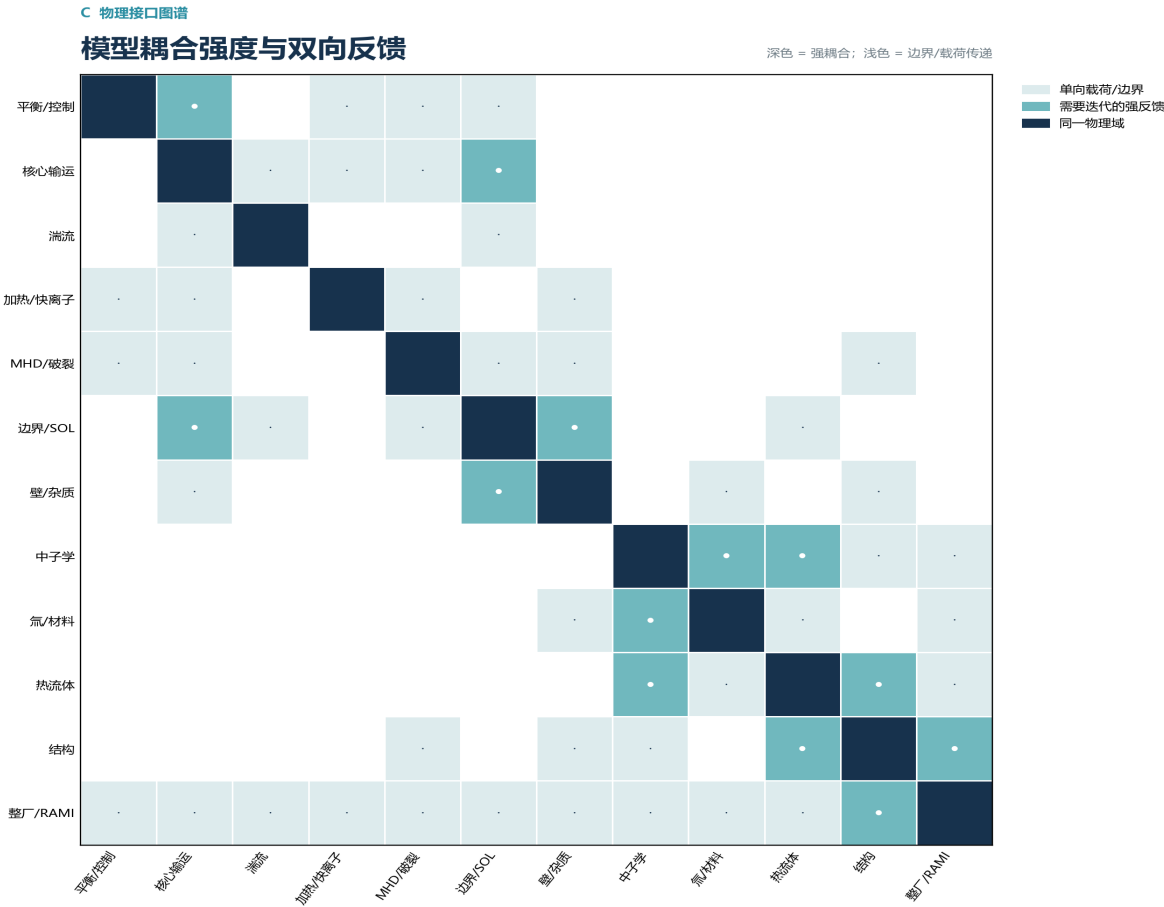


图 6 主要物理域的载荷传递与强反馈矩阵。作者绘制。

单向松耦合适合影响明显单向、反馈较弱的问题，例如把等离子体中子源传给屏蔽计算。迭代松耦合适合核心—边界或电磁—结构需要收敛的问题。强耦合在同一时间步内解多个方程，稳定但开发与计算成本高。共仿真用主时钟与接口交换不同求解器状态，必须处理步长、事件、代数环和能量守恒。离线数据库/代理耦合则把昂贵模型压缩成可查询形式，适合控制和大规模优化。

接口契约至少应定义：变量物理含义、单位与坐标、网格/几何、符号约定、时间戳、插值/外推规则、守恒量、误差/协方差、有效范围、缺失值和版本。IMAS 的集成数据结构（IDS）提供了重要的数据本体方向；OMAS、OMFIT、IPS、EUROfusion 工作流和 FUSE 则展示不同编排路径。采用 IMAS 不会自动解决所有语义问题，但能显著降低“同名不同义”和一次性适配器泛滥。

4.3 可信度预算

对关键输出建立“可信度预算”，类似误差预算但范围更广：输入测量不确定度、参数不确定度、离散化误差、模型形式误差、耦合误差、代理误差、软件缺陷风险和运行环境风险。对每个用途定义容许总误差和安全裕量，再反推哪些模型值得提精度、哪些诊断值得增加、哪些接口必须重构。若模型形式误差占主导，增加网格分辨率只会更精确地求解一个不足的方程。

不确定度传播可用局部灵敏度、蒙特卡洛、拉丁超立方、稀疏网格、Polynomial Chaos、贝叶斯推断或多保真方法。高维昂贵模型通常需主动子空间、全局敏感性和代理。概率输出必须检验校准度；安全分析还要考虑尾部、相关性与认知不确定性，不能把“缺乏知识”随意当成正态随机变量。

5. 平衡、重建、控制：DINA 与 MEQ 的战略切入

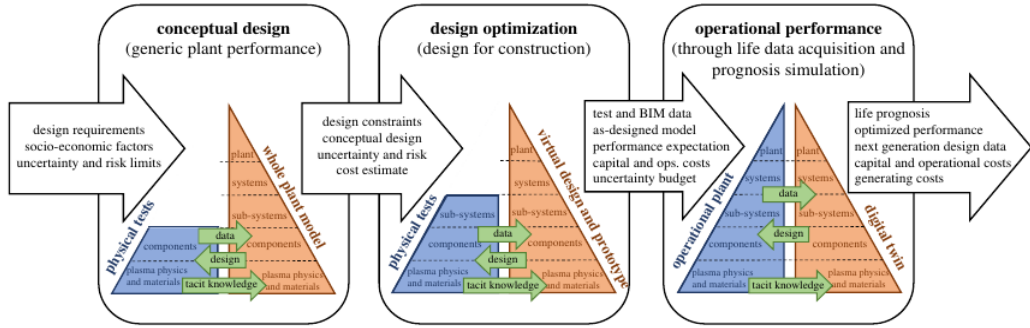


Figure 1. Schematic diagram of the evolving interface between the real-world (blue) and virtual environment (orange) as a fusion power plant progresses: from the conceptual design stage (left), when only limited physical test data is available; through the design embodiment stage (centre), including optimization of design with greater investment in tests and mock-ups; to an operational plant (right), when a digital twin is created from the accumulation of models and real-world data. At each stage, data from the real world supports the development of high-fidelity models through both realistic inputs and validation processes, while the models can be used to guide activity in the real world, as shown by the green arrows. The flow of information in and out of the stages are shown by the arrows at the top of the diagram.

图 7 聚变电厂集成数字框架。Patterson et al. (2019), CC BY 4.0。

5.1 问题边界

轴对称平衡模型处理磁通、压力和环向电流之间的力平衡；自由边界模型把等离子体边界与外部线圈、真空室和被动导体共同求解；平衡重建则从不完备且带噪的诊断反演平衡。三者虽然使用相近方程，却分别服务于“预测”“设计/控制”和“诊断解释”。若数字孪生把重建输出直接当成真值，可能把正则化、诊断偏置和模型先验隐藏起来。建议同时保存原始诊断、拟合残差、约束集、后验协方差/质量标记与平衡结果。

MEQ 是一套围绕托卡马克平衡和控制的工具体系。公开的 2026 年 IAEA 材料将其 workflow 分为三类：FGE 由极向场线圈电压驱动自由边界时间演化，可与控制器、外电路和快速一维输运连接；LIUQE 用磁诊断和其他约束进行平衡重建，并在 TCV 上支持实时与离线分析；FBT 用于轨迹设计和控制参考生成。公开材料给出的 TCV 实时 LIUQE 示例使用约 28×65 网格，磁信号以约 10 kHz 输入，部分输出可在数百微秒级计算，完整输出约毫秒级。这里的数字只能作为特定硬件、网格、版本与配置下的公开证据，不能直接承诺到另一装置。

DINA 是轴对称自由边界平衡—输运—电路模拟器，描述等离子体电流和热演化、极向场系统、真空室及被动结构、控制和异常场景。它在 ITER 场景与控制研究、JT-60SA 线圈/电源和运行研究等公开工作中出现。ITER 于 2025 年把 DINA Plasma Simulator 与部分 IMAS 基础设施和物理模型开放发布，这改善了复现和集成条件，但历史版本、装置专用配置和机构分支仍可能有不同授权与质量状态。

MEQ 的优势是贴近 TCV 的控制生命周期：放电前设计、闭环仿真、实时运行和放电后重建使用相容的模型语言；DINA 的优势是自由边界、输运、外电路与控制的综合经验及大装置场景应用。二者并非简单替代。未来平台应把共同能力抽象成接口合同，把代码差异当成模型集成和交叉验证资源，而不是急于“统一成一个代码”。

5.2 同类代码与适用范围

EFIT 是最广泛使用的平衡重建家族之一，存在多机构分支、实时版本和不同许可；它的优势是装置经验与诊断生态，风险是“EFIT”名称不能唯一标识算法、约束与版本。FreeGS 是 Python 开源 Grad-Shafranov 工具，适合教育、原型和场景设计；FreeGSNKE 增加等离子体—导体动力学，适合控制研究。CREATE-NL、FIESTA、GSevolve、NICE、TokaMaker 等覆盖线性/非线性自由边界、电路、控制设计或有限元求解。EQUINOX、GSfit、LIUQE 等侧重重建。CHEASE、HELENA 多用于固定边界平衡和稳定性/输运链的标准输入。

选型不能只问“谁更准”，而应按任务比较：是否支持装置几何和铁磁/非轴对称效应；被动结构如何离散；电源限幅、时延和开关如何表示；是否能给出线性化模型与响应矩阵；重建支持哪些诊断和先验；实时最坏时延；初始化失败模式；与 IMAS/装置数据库接口；

测试覆盖、编译链、许可和长期维护者。对于控制，确定性和故障可诊断性往往比离线平均精度更重要。

5.3 建议的 DINA/MEQ 服务架构

E DINA / MEQ 演进架构

保留可审计求解器，以标准数据与证据层扩展物理边界

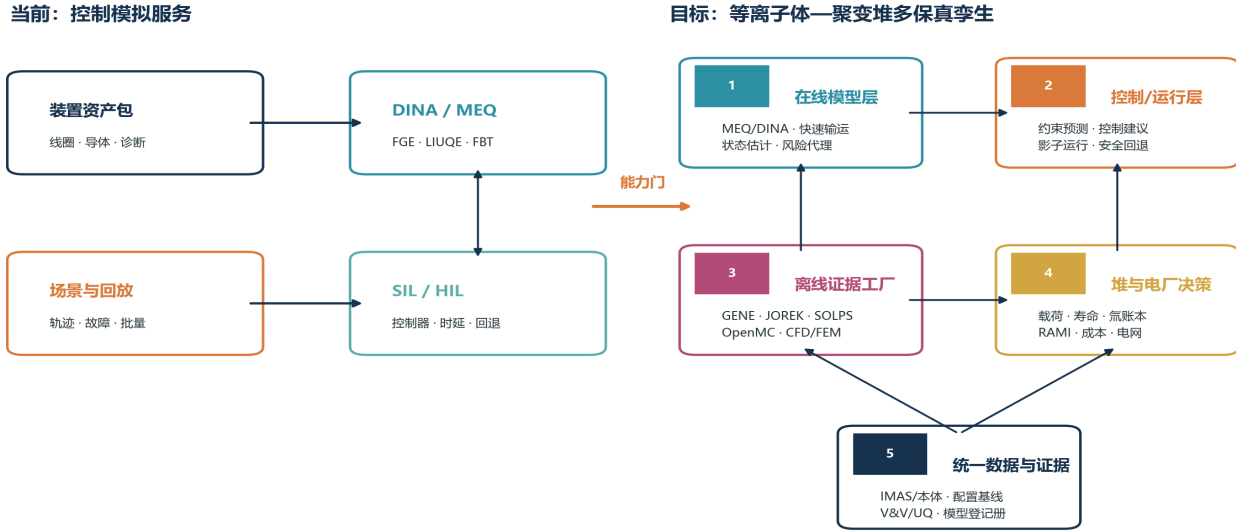


图 8 DINA/MEQ 控制服务向多保真孪生的演进架构。作者绘制。

第一层是不可变“物理资产包”：几何、线圈/电源、被动导体、传感器、材料/电路参数和坐标定义，带版本与校验和。第二层是模型运行容器：DINA、MEQ 各自的求解器和配置，输出标准 IDS 或等价数据结构。第三层是场景服务：初始化、轨迹、故障注入、批量扫描和回放。第四层是控制集成：仿真时钟、I/O 映射、SIL/PIL/HIL、实时监视。第五层是证据服务：测试、基准、残差、时延分布、异常日志和可追溯报告。

首批验收基准应包括圆截面/已知解析平衡、单线圈和多导体电路响应、受控垂直位移、形状轨迹、诊断噪声/丢包、执行器饱和、初始化边界和历史放电回放。DINA 与 MEQ 在共同简化问题上比较并不能证明任何一方“真实”，但可快速发现符号、单位、导体离散和控制接口错误。随后再用装置数据验证形状、位置、电流、环电压和控制动作，逐项说明观测误差与模型形式偏差。

6. 核心输运、源项、快离子与场景集成

6.1 集成输运的角色

1.5D 输运代码在磁面上演化温度、密度、动量和电流等剖面；“1.5D”表示径向输运是一维，但几何和源项来自二维平衡并在磁面上处理。它们需要湍流/新经典输运模型、加热与电流驱动、粒子源、辐射、锯齿/ELM 等事件模型和边界条件。TRANSP、JINTRAC、ASTRA、CRONOS、ETS、TOPICS、CORSICA、TASK 等代表不同机构生态；RAPTOR、METIS 更强调快速预测或控制用途；TGYRO、T3D 等把输运求解与 TGLF/CGYRO/GX 等模型耦合。

TRANSP 长期用于实验解释和场景预测，包含平衡、NUBEAM 中性束、加热、电流、粒子和能量核算等广泛能力，并逐步接入 IMAS、自动测试和现代工作流。它强大的装置经验也是复杂度来源：配置项、历史约定和模块组合需要领域专家治理。JINTRAC 把 JETTO 核心输运、EDG8/EDGE2D-EIRENE 边界、源项和 MHD 事件模型结合，服务 JET、ITER 等集成预测。ASTRA/CRONOS 在欧洲装置和控制/场景研究中广泛使用。ETS 是 IMAS 生态中的模块化输运工作流。

验证应分层进行。首先对粒子、能量和电流守恒、解析扩散问题、时间步和网格做数值验证；其次对单个源项与独立代码/实验诊断比较；再对历史放电做“解释模式”回放；最后在不利用目标结果调参的条件下做真正预测。必须记录边界条件和校准参数，因为在解释模式中獲得好拟合并不意味着能外推到燃烧等离子体。

6.2 湍流和新经典代码

GENE、CGYRO、GS2、GKW、stella、GX 等局部或全局回旋动力学代码求解扰动分布函数和场；XGC、GTC、ORB5、GYSELA、EUTERPE 等采用粒子/网格或全局方法，适合边界、快粒子或三维几何的不同问题。计算从工作站小型线性扫描到大规模 GPU/MPI 非线性模拟不等。代码间对标准 Cyclone Base Case、线性增长率、非线性通量的比较是验证基础；多装置温度、密度、旋转和波动诊断的多通道比较才更接近物理验证。

TGLF 和 QualiKiz 是主要的准线性约化模型，可以在输运求解器中大量调用。它们需要针对训练/校准域识别偏差；不能因为来自第一性原理思路就省略实验验证。新经典代码 NEO、SFINCS、DKES、KNOSOS 等处理碰撞驱动通量、bootstrap 电流和三维磁场效应，其中 SFINCS、DKES、KNOSOS 对仿星器尤其重要。跨代码接口 Pyrokinetics 把不同回旋动力学输入/输出映射到统一对象，有利于可复现实验和代码比较。

对于数字孪生，推荐建立“湍流证据工厂”：自动从 IMAS/装置数据库生成标准输入，执行分辨率扫描和多代码基准，保存输入、容器、日志和通量，再训练具物理约束与不确定度的代理。在线模型必须进行超域检测；一旦密度、梯度、磁剪切或几何超出训练域，返回“不可用/扩大不确定度”而非自信外推。

6.3 加热、电流驱动和快离子

中性束注入由 NUBEAM、ASCOT5、LOCUST 等蒙卡或轨道跟踪工具处理沉积、慢化、快离子分布和损失。射频/微波链包括 GENRAY、TORAY、TORBEAM、GRAY、TRAVIS 等射线追踪，TORIC、AORSA 等全波求解，以及 LUKE 等动力学/电流驱动工具。不同近似适用于电子回旋、离子回旋、低杂波等频段与传播环境。

ASCOT5 是公开、现代化程度较高的 C/Python/HDF5 轨道跟踪代码，公开论文展示了与新经典理论、ASCOT4 和标准问题的验证，并支持轴对称与三维磁场。LOCUST 以高性能快离子轨道和壁负荷研究见长。验证需比较吸收/沉积、驱动电流、快离子诊断、损失探测器和壁热点；对 α 粒子主导的燃烧等离子体，实验外推不确定度要显式保留。

源项模块和输运模块耦合时必须避免双重计算或不一致，例如快速离子压力是否已进入平衡、碰撞功率是否守恒、射频分布是否与输运物种一致。建议对每次运行生成“功率与粒子审计表”：注入、吸收、辐射、储能变化、输运损失、壁损失与数值残差闭合。

7. MHD、破裂和失控电子

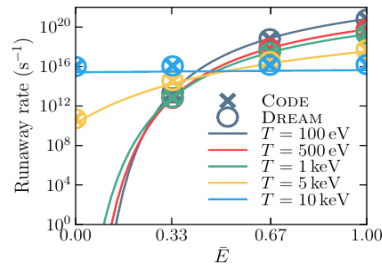


Figure 5: Comparison of the runaway rate as calculated with CODE (circles), with DREAM (crosses) and using the formula given in [29] (solid lines). The dimensionless variable $\tilde{E} = (E - 2E_c)/(0.04E_D - 2E_c)$ is introduced so that $\tilde{E} \in [0, 1]$ covers the region of E in which the runaway generation is mild to modest, and the linearized collision operator is valid. The CODE and DREAM runaway rates match to within 3.5%.

the 1D fluid code Go [67, 49, 68]. The Go code can be considered a predecessor of the fluid mode in DREAM and uses similar models for the background plasma evolution. Using the *fluid* model, as described in section 2.2.3 with a cylindrical radial

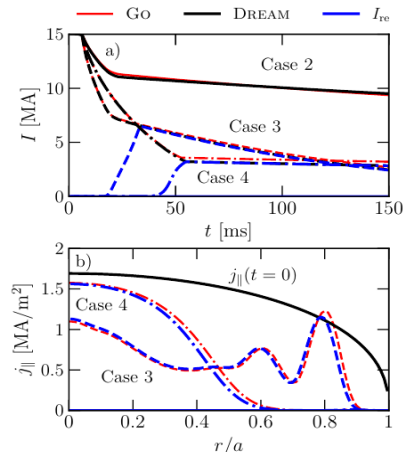


图9 DREAM 与理论/独立代码比较。来源：开放预印本。

7.1 从线性边界到非线性事件

MISHKA、ELITE、MARS-F、NOVA-K、CASTOR3D 等在线性或谱框架下研究理想/电阻 MHD、边缘稳定、旋转和快粒子模；它们适合大范围扫描和稳定性边界。JOREK 使用有限元与隐式时间推进求解非线性扩展 MHD，覆盖 ELM、破裂、垂直位移、RMP 和碎片注入等；M3D-C1 使用高连续性有限元；NIMROD 使用高阶有限元/谱表示；BOUT++ 是可组合的等离子体流体框架，广泛用于边界和 MHD 方程模型。

三维非线性结果不应只用漂亮等值面验证。需比较增长率、守恒、模式结构、饱和幅度、热/电流淬灭时间、壁电流、电磁载荷和诊断合成信号。JOREK、M3D-C1、NIMROD 围绕垂直位移、注入缓解等跨代码比较极其重要，因为真实反应堆破裂数据尚不存在。跨代码一致只能降低实现错误风险，不能消除共同模型缺陷；仍需与现有装置事件、理论标度和专用实验结合。

7.2 DREAM 与失控电子链

DREAM 是流体—动理学框架，以径向一维和动量空间二维表示电场、温度、电流、杂质与失控电子演化。公开验证包括与 CODE 的电导率和失控产生率比较、与 GO 等模型比较以及解析极限。其优势是在比全动力学更可管理的成本下扫描缓解情景；限制来自径向/几何简化、原子过程、输运与混合模型和实验参数不确定度。GO、NORSE 等提供互补层级，SMITER 等用于失控电子轨道/壁载荷分析。

面向 ITER/反应堆的破裂孪生应形成事件树，而不是单一确定轨迹：触发与前兆、热淬灭、杂质混合、电流淬灭、失控种子与雪崩、轨道损失、壁载荷、结构响应、保护动作。每个节点标识模型、分支概率/认知不确定度和证据。快速告警只预测可观测风险，DREAM/JOREK 类高保真模型负责离线生成边界与干预策略，安全系统仍应依据经批准的保护逻辑。

8. 边界、偏滤器、等离子体—壁相互作用

SOLPS-ITER 把 B2.5 多流体等离子体与 EIRENE 蒙卡中性粒子耦合，是 ITER 边界设计的重要工具；EDGE2D-EIRENE 与 JET/JINTRAC 生态密切；UEDGE 提供二维边界流体模拟；SOLEEDGE3X-EIRENE、EMC3-EIRENE 面向三维几何和非轴对称问题，后者在 W7-X 等仿星器应用突出。Hermes-3 基于 BOUT++ 构建多组分模型，可用相近方程在 1D/2D/3D 不同保真度运行。

这些代码通常需要经验或异常横向输运系数、原子分子数据库、壁回收系数和泵/加料边界。一个与实验吻合的靶板热流可能由错误的上游功率、输运系数和辐射分配相互补偿产生。因此验证应同时比较上游剖面、辐射分布、中性压力、光谱、靶板 Langmuir 探针、红外热流和杂质浓度，并通过合成诊断把数值场映射到真实测量。

GBS、TOKAM3X、GRILLIX 和边界湍流 BOUT++ 模型研究第一性/机理更强的三维湍流，计算昂贵；它们可用于约束二维代码的异常输运与间歇载荷。ERO2.0、GITR、DIVIMP 处理杂质产生、输运、再沉积和壁负荷。GITR 公开 C++/GPU 实现适合粒子轨道与等离子体—材料相互作用扫描。边界孪生的近期目标不应是全三维实时，而应是：以诊断同化的二维模型给出功率/粒子状态，以高保真数据库给出置信区间和异常事件修正。

9. 仿星器与其他构型

仿星器依靠外部三维线圈产生主要约束磁场，能避免托卡马克大等离子体电流及相关破裂风险，但引入复杂三维平衡、轨道、新经典输运、线圈制造和边界结构。VMEC 假设嵌套磁面求三维理想 MHD 平衡，是 W7-X 等设计分析的基础；DESC 使用现代数值/自动微分生态求平衡和优化；SPEC 允许磁岛/混沌区分区；PIES、HINT、GVEC 提供不同方程和表示。STELLOPT、SIMSOPT、FOCUS、REGCOIL、COILOPT++ 支持形状和线圈优化。

VMEC 的嵌套磁面假设既是效率来源也是适用域限制。验证需要与磁测、电子束映射、平衡重建、剖面和输运比较，并在磁岛或随机场重要时换用适当工具。W7-X 边界常用 EMC3-EIRENE；核心输运还需要 SFINCS、DKES、KNOSOS 及回旋动理学代码。数字孪生架构应把“托卡马克特有模块”和“构型无关接口”分开：几何、网格、场、物种、功率、诊断和证据可共用本体，而电流控制、破裂和三维新经典物理不可硬套。

惯性约束聚变使用激光或脉冲功率压缩靶丸，主模拟是辐射流体力学、激光—等离子体相互作用、材料状态方程与不稳定性。

HYDRA、LASNEX、xRAGE 等多为国家实验室受限代码；FLASH-X 为开放的 AMR 多物理框架；MULTI-IFE、MACH2 等覆盖辐射流体或脉冲功率问题。它们与磁约束聚变的控制和厂级数据架构有可借鉴处，但本项目若以 DINA/MEQ 起步，不宜在早期把 ICF 物理纳入同一实施范围。

10. 中子学、包层、氦、材料与工程多物理

10.1 中子与活化

OpenMC、MCNP、Serpent、TRIPOLI-4 是连续能量蒙特卡洛中子/光子输运的主要代表。OpenMC 开源，使用 C++ 核心和 Python 建模/后处理，适合可复现 workflow；MCNP 历史验证和用户基础深厚，但受许可与出口条件限制；Serpent 在反应堆物理和燃料方面生态成熟；TRIPOLI-4 由 CEA 开发并有特定授权。DAGMC 可直接在 CAD 几何上做蒙特卡洛跟踪，减少手工转化，但几何健壮性、缝隙、材料标记和容差仍需质量检查。

聚变中子学不同于传统裂变临界计算的关注重点：14 MeV 源、深穿透屏蔽、核热、氦增殖、磁体剂量、维护剂量和复杂 CAD 都很突出。验证要用 FNG、OKTAVIAN 等积分实验、核数据库基准、简化球/板问题和跨代码比较；还要把核数据协方差传播到氦增殖比、剂量和核热。一个蒙特卡洛统计误差很小的结果仍可能受核数据库、几何遗漏和源分布误差主导。

FISPACT-II、ALARA 等把中子谱与材料组成转化为活度、衰变热、剂量和废物分类。FISPACT-II 官方提供系统验证入口。活化结果对微量杂质和照射/冷却历史敏感，因此材料不能只写“钢”或“钨”；要版本化化学组成、批次假设和时间序列。面向维护孪生，应把三维剂量场、工作包、机器人/人员路径与冷却时间耦合。

10.2 氦增殖与迁移

氦自持要求包层在考虑提取损失、衰变、库存、处理时延和不确定度后提供足够的系统级增殖裕量。局部蒙特卡洛计算的 TBR 不是完整结论；还需包层覆盖率、穿孔、加热/诊断口、材料制造偏差和核数据不确定度。氦随后在增殖材料、结构和冷却剂中扩散、被陷阱捕获、渗透和释放。

FESTIM 基于 Python/FEniCS，面向氢同位素扩散、俘获、热耦合和复杂几何；公开 V&V 工作包含制造解、解析解、跨代码和实验比较。TMAP8 建于 MOOSE 框架，承接 TMAP 系列氦迁移分析；mHIT 等研究工具提供互补。验证必须明确陷阱密度/能量、表面复合、温度依赖扩散和辐照演化的来源。材料试样上的拟合参数不能无条件外推到中子辐照、接缝和真实部件。

建议建立“氦账本”：燃料注入、等离子体未燃烧回收、泵与处理、包层产生、各系统库存、渗透、排放与测量误差随时间守恒。每个子模型返回通量与库存及不确定度；质量不闭合应被视为接口错误或未知源项，而非后处理调平。

10.3 热流体、结构与液态金属 MHD

OpenFOAM、ANSYS Fluent/CFX、STAR-CCM+、COMSOL 用于 CFD 与传热；ANSYS Mechanical、Abaqus、Code_Aster、CalculiX、Elmer 用于结构/热应力或多物理；MOOSE/Cardinal 提供可组合有限元和反应堆多物理；RELAP5-3D、MELCOR Fusion/相关版本处理系统热工与事故。商业工具的集成、技术支持和行业认证生态常有优势，但模型、网格、脚本和求解器版本仍必须由项目负责验证。

液态金属包层在强磁场中出现显著洛伦兹力、压降、速度剖面变化和电绝缘涂层效应。FreeMHD、HIMAG、MHD-UCAS 以及 COMSOL、ANSYS、OpenFOAM 的 MHD 实现用于不同研究。V&V 应从 Hartmann 管流、方腔、导电壁等标准基准到磁场梯度与试验回路逐层升级。几何细节、接触电阻和壁电导对结果敏感，不能只比较平均压降。

结构模型接收电磁力、热负荷、压力、重力、地震和辐照后材料性能。应做网格收敛、接触/边界敏感性、非线性材料与疲劳/断裂评估，并按适用设计规范独立审查。数字孪生若用于寿命管理，需要把实际脉冲谱、制造偏差、检查结果和损伤累积更新进去，而不是反复运行名义工况有限元。

11. 系统代码、整厂设计与数字线程

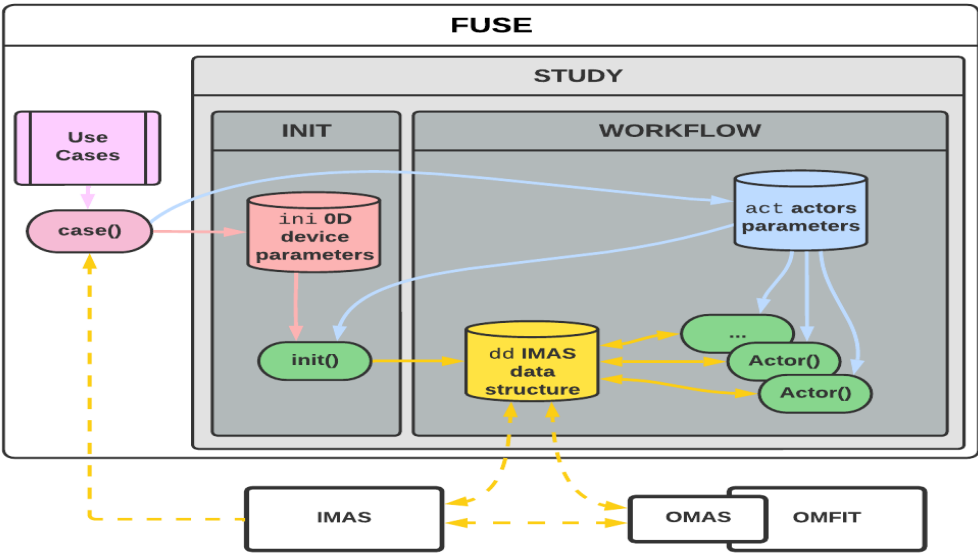


图 10 FUSE 数据本体与多保真架构。来源：开放预印本。

PROCESS 是 UKAEA 开源系统代码，以等离子体物理、磁体、功率、建筑、成本等约束求解聚变电厂点设计与优化；其 Python 化和公开仓库有利于审查与自动化。ARIES 系统研究形成了一套成熟的电厂设计方法与代码资产，但具体实现和可获得性不统一。SYCOMORE 是欧洲系统建模工具之一。FUSE 使用 Julia 和 IMAS 数据本体组织多保真集成设计，强调可微/优化工作流与模块替换；pyFECONs 等处理经济分析；BLUEPRINT/BlueMira 等支持参数化几何与设计集成。

系统代码的价值是快速闭合数百个约束、识别主导权衡，而不是替代详细设计。0D 缩放关系在超出数据库范围时可能产生“数值闭合、物理不可信”的点设计。正确工作流是：系统代码探索与筛选—中保真物理/工程验证—局部高保真计算—更新缩放关系/代理和不确定度—再次优化。每轮要保存设计变量、约束活跃集、模型版本和被淘汰原因，避免只保留最后一组漂亮参数。

Patterson 等提出的集成数字框架把参数化 CAD、物理模型、工程分析、优化和数据管理连成循环；STEP 公开概念设计工作流显示 PROCESS 与 JETTO/FIESTA 等逐步交互，UKAEA 又把 Virtual STEP 和参考数字孪生作为长期能力方向。DOE 2026 路线也强调模块化整厂建模、数字线程和最终的全设施孪生。公开战略说明方向一致，但尚不能证明任何组织已拥有经全生命周期验证的“整厂实时孪生”。

建议采用三类主数据：产品结构描述系统—子系统—部件及配置；工况/场景结构描述放电、事故、维护和电网时间线；证据结构描述模型、试验、验证、假设和不确定度。三者通过不可变标识连接。CAD/PLM、需求、仿真、实验数据库和运维平台不必强行替换成一个系统，但必须有主权边界、变更事件和语义映射。

11A. 集成模拟专题：框架全景、能力边界与数字孪生差距

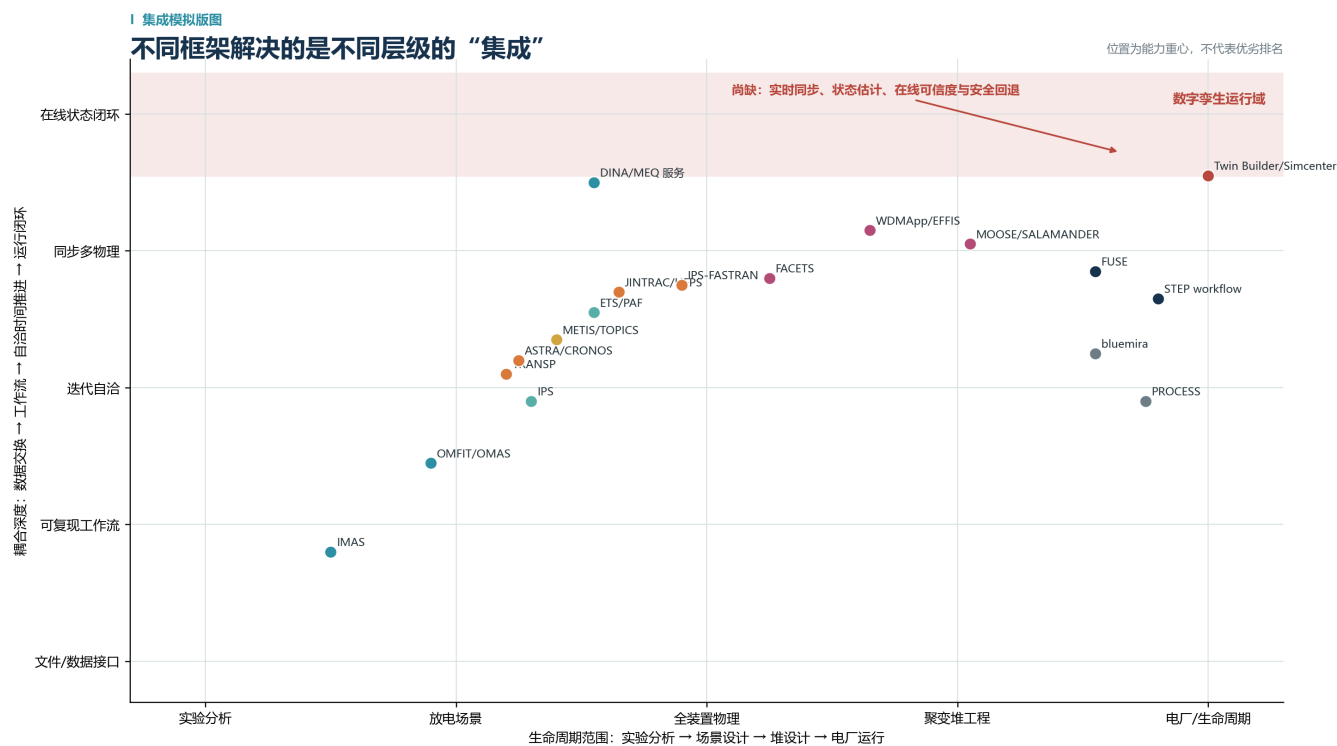


图 11 集成模拟框架的生命周期范围与耦合深度。作者绘制。

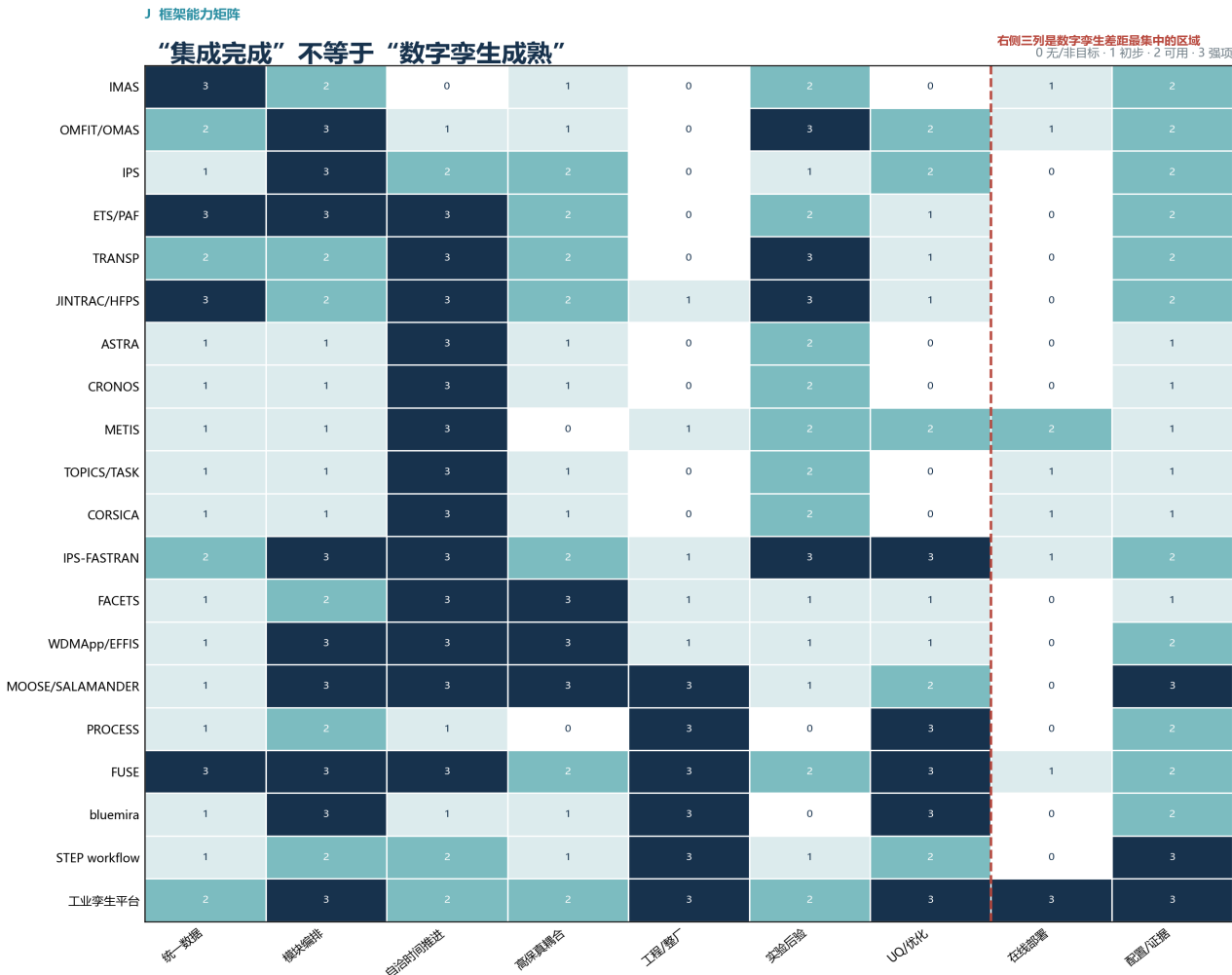


图 12 框架能力矩阵；评分为路线规划示意。作者绘制。

11A.1 为什么需要把“集成模拟”单独讲清楚

聚变领域经常把几种不同事物都称为“集成模拟”：有时指一个代码同时求解平衡、输运和源项；有时指用 workflow 把多个独立程序依次调用；有时指统一数据结构和数据库；有时又指从等离子体、包层一直算到净电功率与成本。它们都合理，但回答的问题、时间尺度、验证方式和软件复杂度完全不同。如果不先区分，就会出现两个危险误解：第一，把“多个程序成功跑完”当作“多物理已经自治”；第二，把“已有整厂设计 workflow”当作“已经拥有运行中的数字孪生”。

本章将集成模拟定义为：围绕一个明确的科学或工程问题，把两个及以上具有不同方程、尺度、代码所有权或数据来源的模型，按照显式接口、耦合算法和执行流程组成可重复计算系统。这个定义包含四个层次。数据集成解决名称、单位、坐标、几何和存储； workflow 集成解决组件选择、依赖、调度和失败处理；物理集成解决状态变量、边界条件、反馈、守恒和收敛；决策集成解决结果如何进入实验计划、设计优化、运行建议或控制。前两层可以由软件平台提供，后两层必须由物理、数值、实验和工程共同负责。

数字孪生则在此基础上增加持续的物理资产连接：它要知道“当前是哪台装置、哪个配置、哪次脉冲、哪个部件、什么健康状态”，持续接收观测并更新不可直接测量的状态，按规定时限预测未来，给出不确定度和质量标记，并在授权边界内产生建议或控制，同时保留安全回退与全生命周期证据。因此，集成模拟通常是数字孪生的模型与证据工厂，但并不自动成为数字孪生。

公开资料显示，IMAS 在 2025 年以开源许可证发布基础设施和多项物理应用，明确把机器无关数据字典、实验/模拟数据和工作流作为 ITER 系统性脉冲规划与分析的基础；FUSE、PROCESS、bluemira 和 STEP 工作流正在把等离子体、工程与整厂设计拉入同一设计空间；WDMApp、EFFIS、FACETS、MOOSE/SALAMANDER 则从高性能计算或工程多物理方向推进更强耦合。这些进展非常重要，但公开证据仍不支持“某一框架已经覆盖并验证聚变电厂全生命周期运行孪生”的结论。[IS1-IS8]

11A.2 评价框架：不能只问“能接多少代码”

本章对每个框架从九个维度评价。第一是指定用途：实验解释、场景预测、控制验证、全装置高保真、堆工程或整厂优化。第二是状态与方程覆盖：是否真正时间推进，是否包含电流扩散、粒子/能量/动量输运、源项、平衡、边界、结构或电厂动态。第三是耦合语义：文件传递、共享数据对象、迭代松耦合、并发强耦合还是单体求解。第四是数值一致性：通信步长、插值、映射、松弛、收敛和守恒如何处理。第五是可替换性：组件是否能按统一接口切换模型保真度。第六是验证证据：单元/回归、跨代码、实验后验、盲预测或运行影子模式。第七是工程性：许可、语言、HPC、容器、自动测试、故障恢复、日志和长期维护。第八是决策速度：批处理、交互、准实时或硬实时。第九是数字孪生完备性：状态同步、UQ、超域检测、闭环安全、资产配置和生命周期连续性。

图 I 把主要框架放在“生命周期范围—耦合深度”坐标中。图上的位置是能力重心，不是性能排名。IMAS 位于数据与工作流底座；TRANSP、JINTRAC、ETS 位于脉冲时间推进；WDMApp 和 MOOSE/SALAMANDER 位于高保真或工程强耦合；FUSE、PROCESS、bluemira 和 STEP 面向设计闭合；工业孪生平台在部署、系统仿真和资产连接上更成熟，但缺少聚变专用物理与公开验证。任何单点都不能独立覆盖整幅图。

11A.3 数据模型与工作流基础设施

11A.3.1 IMAS：最有战略价值的公共语义骨架

IMAS (Integrated Modelling & Analysis Suite) 的核心不是一个“超级求解器”，而是数据字典、Interface Data Structures (IDS)、访问层、数据库、可视化与工作流工具的集合。它用机器无关结构描述平衡、核心剖面、输运、加热、线圈、诊断、壁和其他对象，使实验与模拟能够使用相同的对象类型。其最大优点是给跨机构、跨语言、跨代码交流提供共同语义，并且把元数据和数据来源纳入结构；对于 ITER 这种长寿命国际设施，这比统一编程语言更现实。2025 年公开发布进一步降低了采用和审计障碍。[IS1, IS2]

IMAS 的第二个优点是“组件替换”潜力：只要组件严格读取和写入约定 IDS，平衡、输运、源项或诊断模型就有机会在同一工作流中替换。第三个优点是支持模拟—实验一致表示，便于合成诊断、后验分析、跨装置数据库和 AI 数据管线。第四个优点是适合作为本项目的科学数据契约：DINA/MEQ 服务可把装置资产、平衡、线圈电流、磁诊断和控制轨迹映射为 IDS，再与输运、边界和工程服务交换。

它的局限同样明确。数据结构一致并不保证物理一致：两个组件可能都写入合法 IDS，却使用不同坐标约定、时间中心、物种定义、符号、插值和边界假设。模式版本迁移、稀疏/三维网格、大型场数据和扩展 MHD 状态仍需要专门映射；2026 年 NIMROD—IMAS 工作也指出扩展 MHD 数据、元数据、谱系和治理仍有缺口。IMAS 本身不规定耦合算法、误差控制、收敛、安全回退或在线调度。因此其距数字孪生的差距主要不是“再加 IDS”，而是建立实时数据质量、状态估计、资产配置、权限、连续 V&V 和运行服务等级。[IS9]

11A.3.2 OMFIT 与 OMAS：实验工作流和科学编排的高生产力环境

OMFIT (One Modeling Framework for Integrated Tasks) 围绕实验数据访问、Python 对象、可视化、远程计算和大量物理模块组织工作流，已用于 DIII-D 的 ATOM 计划，并有 TRANSP、EFIT、TGYRO/TGLF、EPED、ONETWO、MARS、NIMROD、PCS 等模块。OMAS 则在 Python 生态中提供与 IMAS 本体兼容的数据操作与转换。OMFIT 的核心优势是贴近科学家的实际工作：一个模块可以完成数据下载、输入生成、远程提交、结果解析、绘图和参数扫描；它把很多原本依赖个人脚本的流程变成可共享模块。对于快速原型、实验后验、场景优化和跨代码组合，它通常比从零搭建企业级平台更高效。[IS10]

其不足是框架的灵活性也容易产生隐含状态和“脚本即知识”。模块质量、许可、依赖、装置数据库访问和测试覆盖不完全统一；GUI/交互式对象很适合科研，却不天然满足无人值守、确定性延迟、灾难恢复和安全关键变更控制。OMFIT 工作流可连接控制数据或做控制研究，但不能仅凭“能调用 PCS 模块”就认定为运行孪生。改进方向是把关键模块拆为无状态服务，定义版本化输入输出、数据质量和失败语义，建立固定回放集、容器化环境与签名发布；OMFIT 继续承担专家工作台，生产运行由更严格的服务层承载。

11A.3.3 IPS：遗留 HPC 代码耦合的实用框架

Integrated Plasma Simulator (IPS) 最初服务 SWIM，用 Python 框架和包装器编排独立物理代码，提供任务启动、资源管理、数据管理、事件和并行工作流。它的设计重点是批处理 HPC 环境中的松耦合：组件可以保留原语言和可执行文件，以相对小的改造接入；框架负责在计算节点上调用、交换等离子体状态文件和管理多层并行。这使 IPS 很适合把高成本遗留代码组成场景工作流，也支撑 IPS-FASTRAN、波—MHD 等应用。[IS3]

IPS 的优点是工程现实主义：不要求所有代码重写；组件失败和资源调度边界清楚；可做大规模集合与参数扫描。缺点是传统文件或阶段式数据交换带来 I/O、延迟和一致性问题，耦合精度主要由应用驱动程序决定；共享状态文件容易出现“最后写入者获胜”、隐式更新顺序和单位/坐标错误。它以作业完成为主要运行模型，不是为毫秒闭环、持续传感器流或高可用服务设计。要数字孪生化，应保留 IPS 作为离线证据工厂与集合计算后端，增加流式数据网关、服务化组件、结构化事件、检查点/恢复、端到端谱系和在线模

型发布机制，而不是直接把 IPS 作业调度器放入控制网络。

11A.3.4 EU-IM/ETS、Kepler 与 PAF/MUSCLE3：强数据契约下的模块化运输

European Transport Simulator (ETS) 是欧洲集成建模的重要成果，围绕 1.5D 核心运输，把平衡、输运求解、异常/新经典输运、源项和其他模块通过统一数据对象连接。早期使用 CPO 和 Fortran/Kepler 工作流，后来迁移到 IMAS IDS。2025 年公开工作显示 ETS 正发展 Persistent Actor Framework 版本，以 MUSCLE3 连接约 60 个程序和约 150 条单向 IDS 通道，从大量短进程/文件交换转向常驻组件和点对点消息。[IS4, IS11]

ETS 的优点是模块边界和数据契约经过长期社区建设，能系统比较输运模型、源项与平衡，并面向燃烧等离子体场景开展验证；它比单一集成代码更能替换组件。其不足是工作流拓扑复杂，调试跨语言、跨进程、跨版本状态很困难；60 个组件和大量通道会放大配置、启动和故障定位成本。Kepler 可视化工作流利于表达流程，却面临维护、部署和现代 HPC 适配负担。MUSCLE3 适合尺度分离模型的消息耦合和集合/UQ，降低改动子模型的需求，但并不自动解决物理映射、强耦合收敛或安全实时性。

ETS 距数字孪生的关键差距是：主要目标仍是离线脉冲模拟；实验数据进入、状态同化、预测置信度、超域检测和在线服务等尚不是框架的中心约束。最合理路线是将 ETS/PAF 作为高保真脉冲预测与代理数据生成器，选择少量经过严格验证的快速 actor 进入准实时预测层，并用 IMAS 语义保持二者一致。

11A.4 脉冲与核心—边界集成模拟套件

11A.4.1 TRANSP/PTRANSP：实验解释证据最深的综合脉冲代码之一

TRANSP 将磁平衡、能量/粒子/动量平衡、加热和电流驱动、快离子蒙特卡洛、辐射与诊断相关量组合起来，既可解释性运行，也可通过 PT-SOLVER 或 T3D 等路径预测剖面。官方资料显示它持续发布、维护回归测试，并支持 IMAS 输入输出；OMFIT 能编排 TRANSP 运行。其最大优势是跨数十年、多装置的应用积累和成熟源项/快离子能力，特别适合把实验剖面转化为功率平衡、输运和快离子解释，也适合场景预测基线。[IS12]

缺点包括复杂配置和长历史包袱，模块由多团队维护、许可需要协议、部分外部模型有独立约束；解释性运行依赖测量剖面，拟合和测量误差可能被误当成模型预测能力。预测模式的可信度又强烈依赖所选输运模型、边界条件和数值设置。TRANSP 的“全脉冲”主要指等离子体核心与源项，不等于边界、壁、中子、氦、结构和电厂全覆盖。

距离数字孪生，TRANSP 缺少硬实时确定性、连续状态同化和控制安全封装。它最适合三个角色：放电后权威解释基线；实验前场景和敏感性研究；为快速输运、风险代理和虚拟诊断提供训练与校准数据。若进入近实时，应只部署经过降阶和域限制的子模型，保留 TRANSP 离线复核。

11A.4.2 JINTRAC/HFPS：ITER 与 JET 场景的核心—边界集成链

JINTRAC 以 JETTO 核心输运为主，组合 SANCO 杂质、加热/电流驱动、颗粒源以及 EDGE2D-EIRENE 等边界能力，可做解释性或预测性全脉冲模拟。它在 JET、ITER、JT-60SA、STEP 等场景中有广泛应用；ITER 高保真等离子体模拟器 (HFPS) 把 DINA 和 JINTRAC 适配为 IMAS 原生组件，用于场景规划与系统能力验证。JINTRAC 的优势是核心—边界—源项链比纯核心代码更完整，并拥有 JET 氦氖和多装置应用证据；其场景工作流能把等离子体建立、平顶和终止放在同一时间线分析。[IS13, IS14]

主要局限是计算成本、配置复杂度、许可和专家依赖；核心与边界的迭代通常仍需人为选择边界、松弛、时间窗和收敛条件。边界湍流、壁材料演化、破裂非线性和三维效应不能由 1.5D 链完全覆盖。公开“成功模拟场景”也不等于对所有反应堆工况完成盲预测。

数字孪生化重点应是把 JINTRAC/HFPS 输出转为可追踪场景数据库和多保真模型：在线层只保留有限维状态、快速源项和约束预测；离线层持续用新实验重跑并更新偏差模型。DINA—JINTRAC 耦合还需把控制器真实采样、执行器饱和、诊断延迟、故障和不确定度放入同一验证回路。

11A.4.3 ASTRA：轻量、灵活、长期使用的 1D 输运工作台

ASTRA 求解时变一维输运方程，并可连接平衡、加热和输运模型。它的优势是计算相对快速、公式和模型改动灵活，适合科研团队快速测试输运假设、场景和控制概念；在 AUG、ITER、JT-60SA 和多种装置研究中长期使用。近期工作还在扩展托卡马克/仿星器统一输运和 VMEC 耦合。

局限是发行、模块、文档和自动测试长期依赖特定研究网络，工程化一致性不如现代开源项目；不同团队的 ASTRA “版本与模块集合”可能不是同一产品。它主要覆盖核心 1D 输运，边界、三维 MHD、壁和电厂需要外接。若用于孪生，首先要冻结可审计发行版、输入模式和回归基线，拆出确定性快速运行核，建立实验数据映射和超域检测；否则它更适合作为专家模型而非生产服务。

11A. 4. 4 CRONOS：模块化全放电预测的成熟方法学资产

CRONOS 把 1D 输运、二维磁平衡、加热/电流驱动、粒子和杂质输运组织为模块化套件，可预测或解释完整托卡马克放电，并曾用于 ITER 场景。它的优势是结构清晰、模型库丰富，2010 年综述详细公开了方程、数值实现和应用，形成重要的方法学基准；与 ASTRA、JINTRAC、TOPICS 的 JT-60SA 跨代码比较也是验证资产。[IS15]

局限是主要实现与 MATLAB/专用模块生态、机构授权和长期维护关联较强，外部团队难以获得完全同构环境；它不是面向流式在线数据、云原生服务或工程生命周期管理构建。数字孪生路线应把其历史场景、基准与物理模块转为独立可验证 actor，避免把整个交互环境直接产品化。

11A. 4. 5 METIS：速度优先的场景设计与控制桥梁

METIS 使用 0D 缩放归一化热/粒子输运与 1D 电流扩散，目标比高保真综合代码快得多地设计场景。它可用于 ITER/DEMO 与装置脉冲预测，并已与 CREATE-NL+ 自由边界平衡和控制律连接，构成 JT-60SA“飞行模拟器”思路。优势是速度、参数扫描和控制耦合友好；能较早暴露线圈、电流扩散、加热和性能目标之间的冲突。[IS16]

代价是物理依赖缩放和简化模型，在边缘、湍流、杂质、MHD 事件和超出现有数据库的反应堆工况上不应单独承担高后果决策。METIS 距数字孪生比高成本代码更近于时延要求，但仍需实时观测同化、在线偏差估计、适用域和回退。它可作为阶段 1—2 的快速场景模型，与 DINA/MEQ 形成自由边界—核心状态联合预测，再由 JINTRAC/TRANSP 离线校准。

11A. 4. 6 TOPICS、TASK 与日本集成建模链

TOPICS 是面向托卡马克核心 1.5D 输运、平衡和场景演化的集成代码，特别用于 JT-60U/JT-60SA；公开研究包括体积爬升中的自由边界一致连接、内部输运垒和与 ASTRA/CRONOS/JINTRAC 的跨代码比较。TASK 则把平衡、扩散输运、射线追踪、全波和速度分布等模块组织起来，BPSD 接口为模块交换提供基础。优点是紧贴 JT-60 系列物理和运行需求，场景验证与装置经验结合；TOPICS 对电流、平衡和输运联动有长期积累。[IS17]

不足是公开获取、英文文档、自动部署和广泛外部贡献有限，模块接口与 IMAS/国际生态的互操作还需要工程投入。其数字孪生价值主要在“装置专用高质量模型与验证用例”，不在成为全球统一平台。合作时应通过 IMAS 或项目数据契约输出状态和证据，而不是要求对方替换本地成熟链。

11A. 4. 7 CORSICA：自由边界、输运、稳定性和控制联合模拟的先驱

CORSICA 将二维平衡、一维输运、稳定性分析和合成诊断结合，并曾通过接口作为 DIII-D Simulink 装置模型的一部分测试控制。其优势是很早就把等离子体演化模型放入控制仿真，说明“物理代码—控制工程平台”的跨界路径可行；对放电建立、形状与剖面联动有价值。[IS18]

局限是混合语言和 Basis 开发环境形成较高维护门槛，许可和可获得性受限，现代 CI、容器、数据本体和多团队维护证据不如新框架。对本项目而言，CORSICA 更适合作为历史方法和对照模型，而非新平台核心；其控制协同思想应由 DINA/MEQ + 标准服务接口 + Simulink/MARTE2 测试环境重新实现。

11A. 4. 8 IPS-FASTRAN 与 OMFIT STEP：理论驱动场景优化

IPS-FASTRAN 在 IPS 上组合平衡、输运、稳定性、加热和 pedestal 等模块，用于 DIII-D、KSTAR、ITER 以及 FNSF、ARC、K-DEMO 等设计，近年强调大规模集合、多保真和 AI/ML 工作流。其优点是理论驱动场景、HPC 集合和优化结合，能够在大量设计点中寻找满足约束的解；缺点是模块许可与机构依赖、工作流复杂和离线计算导向。[IS19]

OMFIT 中名为 STEP (Stability, Transport, Equilibrium, and Pedestal) 的工作流，把 EFIT、ONETWO、TGYRO/TGLF、EPED 和稳定性代码围绕集中 IMAS 数据结构反复迭代，以获得输运、平衡、pedestal 和稳定性自洽的解。它的优势是模块可按顺序、反馈或优化运行，直接面向先进场景；局限是“STEP”与 UKAEA 的 STEP 电厂计划同名但含义不同，且自洽范围仍主要是等离子体，不包括完整堆工程和运行资产。数字孪生应用需要把输出状态、残差、模型选择和不确定度显式化，不能只保存最终收敛点。[IS20]

11A. 4. 9 FyTok、TORAX 等新一代可编程框架

FyTok 采用基于 IMAS 数据字典的驱动、面向对象结构，试图以自顶向下方式构建可组合托卡马克集成模拟器；其价值是现代 Python 生态、语义对象和代码生成/组件化思路。TORAX 以 JAX 构建可微、可加速的核心输运模拟，适合代理、优化、控制研究和大规模参数扫描。二者代表值得关注的方向：从设计之初就考虑可微分、硬件加速、机器学习和清晰数据模型。

它们的共同差距是实验与装置验证积累、完整源项/边界/MHD 覆盖和长期生产维护仍不及老牌套件；“现代技术栈”不能代替几十年物理确认。建议把它们放入创新轨，针对固定 DIII-D/TCV/EAST/ITER 基准与 TRANSP/JINTRAC 交叉比较，并评估编译延迟、数值稳定、梯度正确性和超域行为，再决定是否进入在线候选。

11A.5 全装置高保真与工程多物理框架

11A.5.1 FACETS：核心—边缘—壁并行耦合的系统性尝试

FACETS (Framework Application for Core-Edge Transport Simulations) 目标是并行耦合核心、边缘和壁组件，提供统一时间推进、组件接口与并行数据交换。其历史价值在于把“全装置模型”从概念推进到可执行框架，并系统研究不同网格、时间尺度和代码所有权下的耦合。优点是明确关注核心—边缘反馈、并行性能和组件复用；论文公开了框架设计和并行耦合经验。[IS5]

局限是项目年代较早，许多组件和基础设施并未形成今天意义上的持续公共产品；全装置也主要指等离子体核心—边缘—壁传输，而不是中子、包层、结构、氦和电厂。FACETS 提醒我们：即使框架能并行运行，界面通量、时间分裂和守恒误差仍可能主导结果。其成果应作为耦合算法和基准资产继承，而不是简单复活全部软件栈。

11A.5.2 WDMApp、EFFIS 与 CODAR：面向超算的核心—边界回旋动力学耦合

WDMApp 以 XGC 描述边界、GENE 或 GEM 描述核心，目标是构建高保真全装置回旋动力学输运核；EFFIS/CODAR、ADIOS2、Cheetah/Savanna 等提供并发工作流、数据流、任务组合和高性能交换。它的最大优势是物理保真和并发 HPC 规模：不再把核心和边缘完全割裂，而是在异构超算上进行区域耦合；其计算机科学基础能减少文件 I/O 并支持在线数据分析。[IS6]

不足是计算资源极高、软件访问受控、平台部署复杂，模型覆盖仍集中在等离子体湍流输运；它不适合直接在脉冲控制时限中运行。跨区域匹配、噪声、粒子/网格表示、时间尺度和统计收敛仍是物理与数值挑战。WDMApp 距数字孪生不是“差一个实时接口”，而是需要把高保真结果系统压缩为可验证的输运闭合、代理、误差模型和适用域，再交给在线模型；它是离线证据工厂的顶层，不是在线孪生本体。

11A.5.3 MOOSE、Cardinal、SALAMANDER 与 TMAP8：聚变核工程强耦合底座

MOOSE 是开源并行有限元/有限体多物理框架，提供非线性求解、自动微分、网格自适应、多应用耦合和随机工具。Cardinal 把 OpenMC 中子输运与 NekRS CFD 包装进 MOOSE，支持内存耦合；SALAMANDER 面向聚变系统工程尺度与微结构多尺度计算，并连接 TMAP8 氦迁移和 Cardinal，公开目标包括 NQA-1 质量体系。其优势是强耦合数值基础、现代测试、软件质量和工程物理模块，适合包层核热—流体—结构—氦反馈以及材料状态问题。[IS7]

局限是聚变专用应用仍在快速形成，真实包层材料、液态金属 MHD、辐照演化、接触、制造偏差和实验确认远未全部成熟；高保真三维计算成本也高。MOOSE 能保证求解框架的数值工程质量，不能自动保证输入核数据、材料模型或聚变边界条件正确。距数字孪生还需组件级传感映射、状态/参数同化、在线 ROM、服役历史和检修数据，以及核质量保证范围内的模型变更与认证。

11A.5.4 通用耦合标准：FMI、SSP、Modelica 与 preCICE

FMI 定义模型交换和协同仿真的 FMU 接口，SSP 描述复合系统结构与参数，Modelica 提供非因果多域系统模型；preCICE 专长于分区多物理耦合和网格映射。这类标准的优势是供应商中立、可封装 C/C++/商业求解器和控制模型，适合把冷却回路、电源、真空、氦工厂、热循环与控制系统组成系统级动态模型。FMI 3.0 和 SSP 2.0 对时钟、二进制数据、复合架构和下一代数字孪生更友好。[IS21]

但 FMI 只定义接口，不保证主算法稳定、通信步长合理、能量守恒或 FMU 可在目标平台确定性运行；黑盒 FMU 还会遮蔽内部状态、雅可比和许可。聚变项目应规定 FMI/SSP 使用剖面：单位与坐标、时钟、回滚、事件、导数、误差、质量标记、版本和安全等级；对强耦合等离子体区域不能为了“标准化”而强行黑盒化。

11A.6 整厂设计集成框架

11A.6.1 PROCESS：约束闭合和权衡筛选的稳健起点

PROCESS 以大量 0D/1D 物理、工程、功率与成本关系，在约束下求解或优化聚变电厂设计点。优势是计算快、约束覆盖广、开源与文档化较好，可系统回答尺寸、场强、辅助功率、净电功率和成本之间的依赖，并已用于 STEP。它特别适合设计空间筛选和敏感性分析。[IS22]

不足是许多关系来自缩放、经验或低维近似；在反应堆新区域，数值可行点不一定物理可行。PROCESS 通常求稳态点或简化时间行为，不维护真实资产状态。数字孪生中它应承担长期计划、设计变更影响和经济/可用率上层模型，由高保真与运行数据不断更新缩放关系和参数分布；不应直接给出毫秒控制或部件局部安全结论。

11A.6.2 FUSE：最接近“统一多保真整厂模型图”的开源新框架

FUSE 使用 Julia，以 IMAS 本体风格的中央层次数据结构 `dd` 连接独立 actor，覆盖等离子体、工程、控制、整厂功率、成本和优化；支持从低维、代理到较高保真模型替换，并发展时变 DIII-D 预测/后验工作流。优势包括现代语言性能、统一内存对象、自动微分/优化生态、开源 Apache 2.0、模块化和多目标设计。它比传统系统代码更容易把剖面、几何与控制状态带入整厂设计，是本项目应重点对接的框架。[IS8]

主要风险是年轻：接口和模型仍快速变化，长期稳定性、独立机构验证、跨装置盲预测与工程监管接受度尚在积累。中央共享数据结构提升生产力，却可能形成隐式耦合和写入顺序依赖；actor 返回“成功”不保证全局收敛或守恒。部分工程模型仍是概念设计保真度。距数字孪生还缺稳定运行服务、传感器同化、确定性延迟、故障安全、资产序列号/服役状态、网络与权限治理，以及持续验证的模型发布流程。

11A.6.3 bluemira：参数化几何、CAD 和跨学科设计集成

bluemira 面向未来聚变堆的跨学科设计，强调参数化几何、优化、平衡、磁体、维护/布局与与 PROCESS、CAD/中子学等工具连接。优势是把“表格中的点设计”转为可计算几何和工程对象，使孔口、间隙、磁体、包层和维护空间的冲突更早出现；开源 Python 生态利于自动化。STEP 公开工作也把自动化设计流程向 bluemira 迁移视为方向。[IS23]

局限是几何成功生成不代表可制造或满足全部载荷；不同 CAD/网格/中子学转换中的容差、材料和标识会积累误差。其重点仍是设计，不是运行时动态。数字孪生化需要连接 PLM/需求/制造实物状态、几何偏差和检修配置，建立稳定的资产标识与变更影响分析，并把高保真结果转成部件健康和寿命模型。

11A.6.4 UK STEP 概念设计工作流：现实项目中的分层集成

STEP 公开工作流从 PROCESS 生成初始点设计，再用 JETTO、FIESTA 等提高等离子体与平衡保真度，并并行开展氦增殖、在板构建、排热、功率平衡和更广泛工程评审。其最大优点是承认复杂设计不会由一个代码一次闭合，而是“快速筛选—专业分析—团队评审—更新基线”的层级过程；它把计算结果放回工程决策和配置管理。[IS24]

不足是公开论文也明确指出许多代码仍离散运行、长期才逐步自动化；各专业模型的置信度、设计变更与证据链需要项目治理而非框架自动完成。STEP 工作流与数字孪生的距离集中在制造和运行态：实际部件、传感器、维护、氦库存、可用率和电网事件尚未形成持续闭环。它提供的是设计期数字线程雏形，不是已经投入运行的电厂孪生。

11A.7 商业和通用工业平台：不可忽略，但不能替代聚变物理

11A.7.1 Ansys Twin Builder/Workbench

Twin Builder 组合 0D 多域系统模型、Modelica/FMI、C/C++/Python、Simulink、Ansys 3D 求解器生成的 ROM、IIoT 连接和部署，优势是从高保真仿真到实时系统模型、HIL 和资产数据的成熟工具链；对冷却、电源、真空、热循环和结构虚拟传感器很有吸引力。[IS25] 缺点是商业许可、黑盒求解器与格式、跨版本成本，以及聚变等离子体模型需自行封装。它能解决“怎么部署孪生”，不能证明“孪生中的聚变物理可信”。推荐作为工程子系统与在线 ROM 平台候选，通过 FMI/REST/消息总线与科学模型层连接，不作为唯一主数据本体。

11A.7.2 Siemens Simcenter/Xcelerator

Simcenter 覆盖 CFD、结构、热、电磁、多体、1D 系统、试验数据、优化和可执行数字孪生，2026 版本强调把自包含实时模型部署到运行环境并连接现场数据。优势是工业工程、测试—仿真关联、PLM 和生命周期平台结合，适合泵、换热器、磁体辅助系统、旋转设备和电厂 BOP。[IS26] 缺点是产品组合复杂、许可和数据锁定风险，以及对聚变核心/边界物理没有原生验证。采用时应以开放接口和数据所有权为前提，明确哪些模型可导出、如何长期重现、停订后能否读取证据。

11A.7.3 Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE/SIMULIA

3DEXPERIENCE 把需求、CAD、配置、仿真数据、结构/流体/电磁/多体和协作流程放在企业平台，强项是产品结构、权限、变更、团队协作与设计生命周期，适合大型聚变电厂项目建立统一工程环境。SIMULIA/Isight/Dymola/Abaqus 等可组成多学科仿真。局限同样是商业锁定、复杂实施和科学代码集成成本；平台中的“Virtual Twin”并不等于已完成物理确认。最佳定位是权威产品/配置与工程证据层，IMAS/科学工作流仍管理等等离子体语义，二者通过不可变资产标识和受控映射连接。[IS27]

11A.7.4 COMSOL Multiphysics

COMSOL 的优势是同一有限元环境中快速组合热、结构、电磁、流体、传质和用户 PDE，并可通过 Application Builder/API 发布专用应用。它非常适合单部件或试验装置的多物理原型、氚扩散、热—应力和电磁问题。缺点是超大规模专用求解效率、许可、模型文件可审查性和批量工程化受约束；“同一软件内耦合”仍不意味着材料参数和边界被验证。数字孪生应用宜从经实验验证的小范围模型生成 ROM/代理和虚拟传感器，而非在线运行完整三维模型。

11A.7.5 MATLAB/Simulink/Simscape

MATLAB/Simulink 的优势是控制设计、状态估计、优化、信号处理、SIL/PIL/HIL、代码生成与测试生态；Simscape 提供多域物理，近年 ROM 工具能把高保真第三方模型压缩用于控制和虚拟传感。本项目当前 DINA/MEQ 控制服务很适合在 Simulink 中做控制器、执行器、延迟、故障和回退验证。[IS28] 局限是大型 HPC 物理与聚变数据本体不是其强项，许可和生成代码合规也需管理。其正确角色是在线控制/估计与测试台，不是替代 IMAS、TRANSP/JINTRAC 或工程高保真平台。

11A.7.6 Altair Twin Activate 与其他平台

Twin Activate 以块图、多学科系统仿真、混合保真、AI/HPC 和实时部署为卖点，功能定位与 Twin Builder/Simcenter 系统层相似；Modelon Impact、OpenModelica/Dymola、HEEDS/ModelCenter、3DEXPERIENCE、Isight 也可承担系统模型、优化或流程编排。优点是工业互操作、模型库与部署工具；缺点是聚变专用模型、数据和验证需项目自建。选型不应以演示界面决定，而应做带 DINA/MEQ、冷却回路和真实数据回放的概念验证，比较时延、故障恢复、FMU 兼容、版本重现、许可和数据导出。

11A.8 各类框架的综合优缺点与最终目标差距

图 J 给出能力矩阵。评分表达的是公开能力重心，不能替代项目验收。可得到六个结论。

第一，IMAS 是语义与互操作的首选底座，但不是执行内核。它最能降低未来模型替换和跨装置数据映射成本，却必须配合工作流、状态估计、模型注册和配置治理。

第二，OMFIT/IPS/ETS 是生产力和工作流平台，不应单独承担物理可信度。它们能接很多代码、运行复杂流程，但每条耦合仍需物理接口规范和 V&V。

第三，TRANSP/JINTRAC/ASTRA/CRONOS/TOPICS 等的最大资产是实验历史和专家知识。它们技术栈可能不新，却比新框架拥有更深的装置验证。数字孪生路线必须继承其基准和偏差知识，而不是只迁移方程名称。

第四，WDMApp、FACETS、MOOSE/SALAMANDER 提供高保真耦合证据，但计算时限决定它们主要属于离线工厂。在线层要消费它们生成的闭合关系、ROM、不确定度和危险边界。

第五，PROCESS/FUSE/bluemira/STEP 让设计空间更完整，却仍主要描述“设计中的一类装置”，不是“已制造并正在老化的这一台装置”。还需制造偏差、序列号、检修和服役历史。

第六，工业孪生平台补足部署、PLM、IIoT 和生命周期，但不能提供聚变核心物理。最终架构应是科学平台与工业平台联邦，而非互相取代。

11A.9 耦合方式的优缺点：集成的主要风险往往藏在接口

K 耦合策略

从顺序文件交换到强耦合在线协同

越向右，物理一致性和工程复杂度同时增加

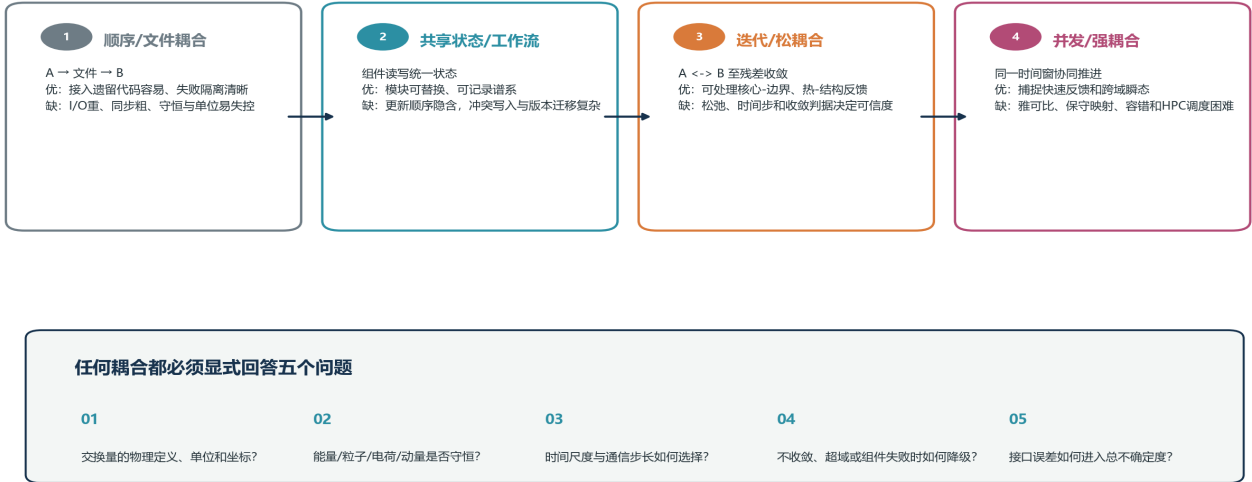


图 13 四类耦合策略及数值与工程风险。作者绘制。

图 K 概括四类耦合。顺序文件耦合接入遗留代码最容易、故障隔离清楚，适合设计工作流和弱反馈，但 I/O 重、时间同步粗，单位与坐标错误难以及时暴露。共享状态/中央数据对象便于模块替换和谱系管理，是 IMAS、OMFIT、FUSE 等常用方式；但组件更新顺序和多写者冲突会成为隐式算法，必须声明读写集、时间戳和事务边界。

迭代松耦合在核心—边界、热—结构、中子—热流体中常见。其可信度取决于通信步、插值、松弛、收敛范数、最大迭代和守恒残差；只报告各子代码收敛不够，必须报告接口残差和分裂误差。并发/强耦合能处理快速反馈并减少分裂误差，但需要雅可比或稳健分区算法、保守网格映射、并发调度、检查点和容错，工程成本最高。

任何框架都必须对五个问题给机器可读答案：交换量的物理定义、单位和坐标；粒子、能量、电荷和动量是否守恒；时间尺度和通信步如何确定；组件失败/超域/不收敛如何降级；接口误差如何进入总不确定度。没有这些，即使界面图画得很完整，也只是“自动化文件传递”。

11A. 10 集成模拟距离数字孪生具体欠缺什么

L 从集成模拟到数字孪生

需要补齐的是运行闭环，不只是继续接入求解器



判断标准：框架是否持续回答“物理资产此刻处于什么状态、接下来会怎样、预测是否可信、允许采取什么行动？”

图 14 从集成模拟到数字孪生的运行闭环缺口。作者绘制。

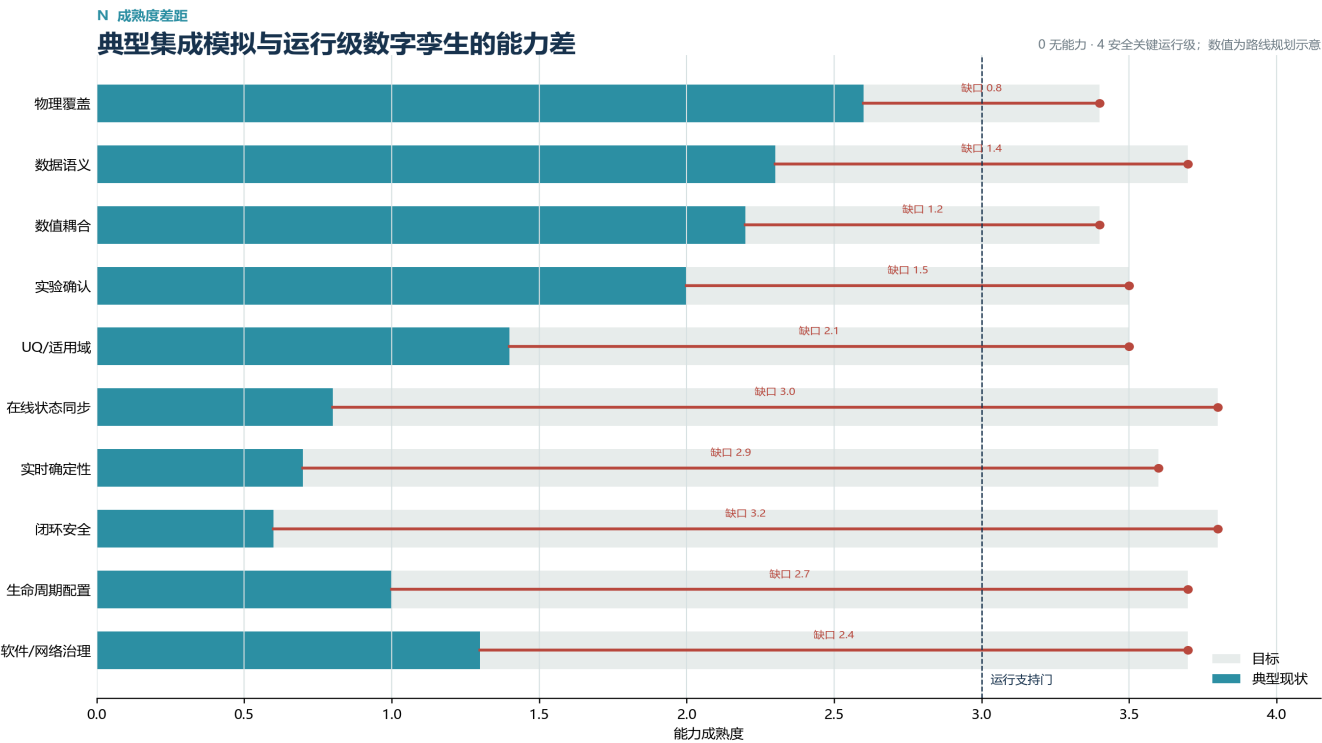


图 15 典型集成模拟与运行级数字孪生的能力差。作者绘制。

图 L 和图 N 显示，典型集成模拟在物理覆盖、数据语义和离线复现方面已经较强，最大缺口集中在在线状态同步、实时确定性、闭环安全、生命周期配置和 UQ。以下十二项是需要系统补齐的能力。

11A. 10. 1 从给定初值转向持续状态估计

大多数集成模拟由专家准备初值和边界后批量运行；数字孪生必须在诊断缺失、噪声、不同采样率和延迟下持续估计平衡、剖面、杂质、壁温、氦库存和部件健康。需要卡尔曼/集合滤波、变分或贝叶斯集成数据分析，明确观测算子、协方差和不可观测性。状态估计失败时要输出质量等级，而不是继续给精确曲线。

11A. 10. 2 从离线文件转向有时间语义的数据流

脉冲数据、PLC/PCS/DCS、工程传感器和仿真时间必须统一到可追踪时基；处理时延、传输时延、采样窗和重采样都要进入数据模型。IMAS 提供科学对象，但运行系统还需消息序列、迟到数据、幂等、背压、断线重连和事件时间处理。错误的时间对齐会制造虚假因果，比缺少一个高保真模型更危险。

11A. 10. 3 从单一保真度转向可调度的模型组合

在线系统不可能始终运行最高保真模型。需要模型选择器根据决策时限、状态区域、资源和风险，在查表、线性响应、ROM、代理、快速物理和离线高保真之间切换；每个模型有适用域、预期误差、最坏时延和回退。切换本身要连续，避免预测跳变影响控制。

11A. 10. 4 从点预测转向端到端不确定度和超域检测

集成模拟常做参数扫描，却很少把诊断、边界、模型形式、数值和接口误差统一传播到最终决策量。数字孪生至少要提供置信区间、概率校准、敏感性和超出训练/验证域的警报。UQ 不能只给离线蒙特卡洛图；在线层要有廉价近似并知道何时拒绝预测。

11A. 10. 5 从一次性论文验证转向连续 V&V；

每次代码、参数、数据模式、编译器、GPU、CAD、材料或代理训练集更新都可能改变结果。需要持续集成中的制造解、守恒、接口、参考放电、跨代码和性能回归；发布前跑盲预测/保留集，部署后做影子运行和残差监测。验证对象必须是“模型+配置+数据+执行环境”，不是论文中的算法名称。

11A. 10. 6 从平均速度转向最坏时延和确定性

控制和保护关心 99.9/99.99 分位时延、抖动、启动、垃圾回收、网络拥塞和故障恢复，而不是平均运行时间。在线候选要做硬件在环、压力、故障注入和资源隔离；超过截止时间时返回上一次可信状态或安全包络，而不是排队等待高保真结果。

11A. 10. 7 从“模型建议”转向权限明确的闭环安全

数字孪生可只读监测、提供建议、约束优化或自动控制，不同权限需要不同证据门。任何自动动作都必须经过可验证约束、联锁边界、速率限制、人工接管和确定性回退；不得让通用 AI 或未经批准模型直接越过保护系统。孪生与安全保护应隔离，前者可优化性能，后者维持独立确定性防线。

11A. 10. 8 从名义设计转向实际资产配置

整厂框架常计算一个理想设计点；实际装置有制造公差、换件、线圈校准、诊断失效、材料批次、焊缝、涂层和辐照历史。需要把产品结构、序列号、几何/材料版本和当前可用系统映射到模型实例。否则孪生只是“同型号模拟器”，不是这台资产的孪生。

11A. 10. 9 从放电时间线扩展到部件和电厂时间线

等离子体模型关注毫秒到小时，寿命、氦库存、维护、停机和经济性跨月到年。需要多时间尺度账本：每次脉冲载荷累积到疲劳、蠕变、辐照损伤和库存；维护改变配置与可用率；电网和热循环约束反向改变场景。不同时间线必须通过守恒量和事件连接，而不是每年手工汇总。

11A. 10. 10 从科研运行转向高可用软件工程

科研工作流允许专家重新提交作业；运行孪生需要健康检查、冗余、检查点、滚动升级、兼容策略、审计日志、灾难恢复和服务等级。闭源组件要有许可服务器失效和供应商退出预案；开源组件要有维护者、长期支持分支和安全补丁。模型服务必须暴露残差、收敛、质量和超域指标，而不只是业务输出。

11A. 10. 11 从开放网络假设转向网络安全和数据治理

控制网、科学计算网、企业 PLM 和云平台的信任边界不同。需要最小权限、零信任网关、代码/模型签名、供应链清单、敏感数据分级、出口与许可控制、不可抵赖审计和离线降级。训练数据和实验数据的权利必须允许长期重训与验证；否则模型会在许可证变化时失去可维护性。

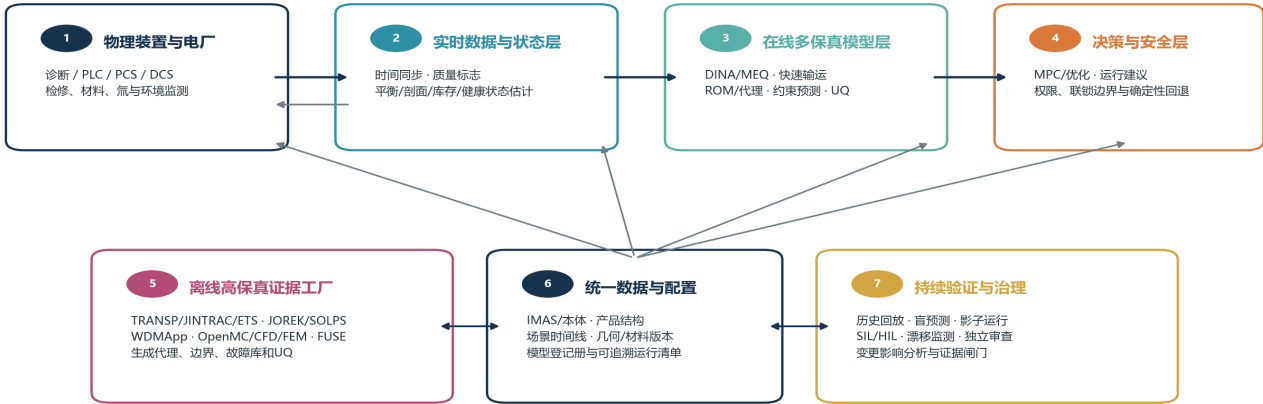
11A. 10. 12 从“框架演示”转向指定用途的组织责任

最终差距往往不是代码，而是责任：谁批准模型用于哪个决策，谁维护数据映射，谁监测漂移，谁对失效模式和回退负责。需要模型产品负责人、物理所有者、数据管理员、控制/安全负责人和独立 V&V 职能。专家签署应针对明确证据与边界，不要求任何人对“整个孪生”笼统背书。

11A. 11 推荐的目标架构：在线运行环与离线证据工厂

M 集成模拟的数字孪生化

双速架构：在线运行环 + 离线证据工厂



高速环以确定性、可降级和低延迟为先；低速环以高保真、实验证据和模型更新为先。两者通过版本化模型与证据门连接。

图 16 在线运行环与离线证据工厂双速架构。作者绘制。

图 M 给出双速架构。上方在线环由物理装置/电厂、实时数据与状态层、在线多保真模型层、决策与安全层组成。它强调确定性、低延迟、可观测、可降级。DINA/MEQ、快速输运、执行器模型、风险代理和部件 ROM 在这里运行，但只有通过指定证据门的版本可发布。

下方离线证据工厂运行 TRANSP/JINTRAC/ETS、JOREK/SOLPS、WDMApp、OpenMC/CFD/FEM、MOOSE/SALAMANDER、PROCESS/FUSE 等，生成代理、边界、故障库、设计包络和 UQ。统一数据与配置层连接 IMAS 科学本体、产品结构、场景时间线、几何材料和模型登记册；持续验证层执行历史回放、盲预测、影子运行、SIL/HIL 和独立审查。

双速架构的关键不是把离线结果“导出一次”给在线层，而是建立受控模型发布：每个在线模型包包含版本、输入输出、训练/校准数据谱系、适用域、误差模型、最坏时延、目标硬件、测试结果、回退版本和批准用途。运行残差和新实验再返回离线工厂，触发更新或降级。

11A. 12 对本项目的分阶段路线：从 DINA/MEQ 到整厂集成孪生

11A. 12. 1 第一阶段：把控制服务做成可验证的“窄孪生”

保留 DINA/MEQ 权威求解器和装置资产包，先统一线圈、导体、传感器、坐标、单位、时间和场景接口；建立历史脉冲回放、SIL/HIL、执行器饱和、诊断延迟、故障注入和最坏时延测试。在线只做影子预测和控制器验证，不直接闭环。交付标准不是 API 上线，而是对指定装置和场景达到 G4 历史回放/盲预测证据，并有确定性回退。

11A. 12. 2 第二阶段：接入快速输运和状态估计

优先连接 METIS、RAPTOR、TORAX 或经降阶的输运模型，形成平衡—电流扩散—温度/密度—执行器联合状态；用 TRANSP/JINTRAC/ETS 作为离线对照。构建观测算子、协方差和超域检测，输出概率包络而非单轨迹。此阶段不追求接入所有物理，而追求 10—100 个代表性放电和故障场景的闭环可解释性。

11A.12.3 第三阶段：建立核心—边界—风险的多保真链

离线接入 JINTRAC/ETS、SOLPS、JOEKE/DREAM 等，生成 pedestal、热流、杂质、破裂和失控电子代理及安全包络。在线层只消费通过验证的风险指标和 ROM；高风险状态触发保守场景、专用缓解模型或退出。模型选择与回退逻辑必须在 HIL 中验证。

11A.12.4 第四阶段：连接聚变堆工程与部件寿命

通过 IMAS/项目本体和资产标识，把脉冲的中子源、热流、电磁力和事件载荷传给 OpenMC、CFD/FEM、FESTIM/TMAP8、MOOSE/SALAMANDER；把温度、形变、氦库存、损伤和允许包络返回场景层。先选一个高价值部件（偏滤器、第一壁、包层模块或磁体）做端到端验证，建立传感器和检修数据同化，而不是一次覆盖整堆。

11A.12.5 第五阶段：整厂和生命周期闭环

用 PROCESS/FUSE/bluemira/STEP 工作流连接净电功率、厂用电、氦自持、RAMI、维护和成本；工业 PLM/数字孪生平台维护产品结构、配置和权限。运行数据持续更新可用率、寿命和经济模型，反向调整放电计划与维护窗口。只有当设计、制造、运行和维护配置保持一致，且关键预测通过连续 V&V，才可称电厂级数字孪生。

11A.13 建议的框架组合，而不是单一平台押注

建议采用“语义骨架 + 科学工作台 + 离线证据工厂 + 在线运行时 + 工程生命周期平台”的联邦组合。

- 语义骨架：IMAS IDS 加项目级产品/场景/证据本体；定义单位、坐标、时间、几何和不确定度。
- 科学工作台：OMFIT/OMAS 与装置原有工具，用于专家分析、数据准备和快速组合。
- 脉冲证据：TRANSP、JINTRAC/HFPS、ETS/PAF、ASTRA/CRONOS/TOPICS、IPS-FASTRAN，按装置证据选择。
- 高保真证据：JOEKE/SOLPS/WDMAApp/FACETS 类物理，以及 OpenMC、MOOSE/SALAMANDER、CFD/FEM、氦/材料模型。
- 整厂设计：PROCESS、FUSE、bluemira 和项目 STEP/DEMO 工作流。
- 在线运行：DINA/MEQ、快速输运、状态估计、ROM/代理、约束优化和独立安全回退，可由 Simulink/MARTE2、FMI 运行时或工业孪生平台承载。
- 生命周期：PLM/配置/需求/维护与数据治理平台；保持供应商中立导出和长期证据归档。

不建议把所有代码迁入同一种语言，也不建议让一个商业平台成为所有物理数据的唯一所有者。统一的应是标识、接口、时间、配置、质量和证据；求解器可以多样。对每个新增框架都做同一 PoC：一个固定配置、一个正常场景、一个故障场景、一组实验回放、一个跨代码比较、一次延迟/恢复测试和完整运行清单。能通过这些门的框架才进入生产路线。

11A.14 本章结论

集成模拟已经解决了数字孪生最困难的一部分：把分散物理知识变成可执行模型组合。IMAS 提供共同语言，OMFIT/IPS/ETS 提供编排，TRANSP/JINTRAC 等提供脉冲证据，WDMAApp/MOOSE 等提供高保真耦合，FUSE/PROCESS/bluemira/STEP 提供整厂设计，工业平台提供部署和生命周期能力。但它们的共同短板是尚未把“运行中的特定资产、持续观测、在线不确定度、确定性时限、安全权限和生命周期配置”同时闭合。

因此，未来路线不应以“接入多少代码”衡量，而应以四个问题衡量：是否持续知道资产当前状态；是否在决策时限内预测未来并知道自己何时不可信；是否把预测限制在授权与安全回退之内；是否让每个结论追溯到正确的配置、模型和实验。完成这四点，集成模拟才真正跨越到数字孪生。

11A.15 专题参考来源

[IS1] ITER Organization, Release of IMAS infrastructure and physics models as open source, 2025, <https://www.iter.org/node/20687/release-imas-infrastructure-and-physics-models-open-source>

[IS2] ITER, What is IMAS and what is it for?, 2026, <https://indico.iter.org/event/732/contributions/4437/attachments/2897/5974/IMAS%20-%20Goals%20and%20objectives.pdf>

[IS3] Integrated Plasma Simulator documentation and ORNL report, <https://ips-framework.readthedocs.io/en/latest/> ; <https://www.ornl.gov/publication/integrated-plasma-simulator-flexible-python-framework-coupled-multiphysics-simulation-0>

[IS4] EUROfusion Integrated Modelling, European Transport Simulator, <https://wpcd-workflows.readthedocs.io/en/latest/ets.html>

- [IS5] Cary et al., FACETS – a Framework for Parallel Coupling of Fusion Components, 2010, <https://arxiv.org/abs/1004.1611>
- [IS6] WDMApp documentation, <https://wdmapp.readthedocs.io/en/latest/>
- [IS7] MOOSE/SALAMANDER/Cardinal official documentation, <https://mooseframework.inl.gov/> ; <https://salamander.inl.gov/> ; <https://cardinal.cels.anl.gov/>
- [IS8] Meneghini et al., FUSE, 2024, <https://arxiv.org/abs/2409.05894> ; <https://fuse.help/>
- [IS9] NIMROD-to-IMAS workflow and schema implications, 2026, <https://arxiv.org/abs/2605.23121>
- [IS10] OMFIT official documentation, <https://omfit.io/>
- [IS11] Coster et al., Persistent Actor Framework version of ETS, 2025, <https://research.chalmers.se/en/publication/552267> ; MUSCLE3, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7304760/>
- [IS12] Pankin et al., TRANSP integrated modeling code, CPC 312 (2025) 109611, <https://transp.pppl.gov/biblio.html>
- [IS13] Romanelli et al., JINTRAC overview and ITER integrated modelling materials, https://www.iter.org/sites/default/files/media/2025-07/l-3_wiesen.pdf
- [IS14] ITER IMAS developments and High Fidelity Plasma Simulator, https://conferences.iaea.org/event/214/contributions/17232/attachments/10466/14945/Pinches_-_IMAS_Poster_-_IAEA_FEC_2020.pdf
- [IS15] Artaud et al., The CRONOS suite of codes for integrated tokamak modeling, Nuclear Fusion 50 (2010) 043001, <https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/4/043001>
- [IS16] METIS-CREATE-NL+ JT-60SA flight simulator, Fusion Engineering and Design 190 (2023), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379623002156>
- [IS17] JT-60SA Research Plan and integrated code inventory, https://www.jt60sa.org/wp/wp-content/uploads/2021/02/JT-60SA_Res_Plan-5.pdf
- [IS18] Meyer et al., CORSICA and Simulink Tokamak Plasma Model for Control Simulations, 2004.
- [IS19] IPS-FASTRAN Integrated Modeling for Tokamak Pulse Simulation and Fusion Pilot Plant Design, APS DPP 2024, <https://meetings-archive.aps.org/dpp/2024/cm11/10/>
- [IS20] Lyons et al., Flexible integrated modeling of stability, transport, equilibrium and pedestal physics, 2023, <https://arxiv.org/abs/2305.09683>
- [IS21] Modelica Association FMI/SSP standards, <https://modelica.org/association/> ; <https://modelica.org/news/2025-01-08-ssp-20-released/>
- [IS22] UKAEA PROCESS official documentation, <https://ukaea.github.io/PROCESS/>
- [IS23] bluemira documentation and repository, <https://bluemira.readthedocs.io/> ; <https://github.com/Fusion-Power-Plant-Framework/bluemira>
- [IS24] Muldrew et al., Conceptual design workflow for the STEP Prototype Powerplant, Fusion Engineering and Design 201 (2024) 114238, <https://scientific-publications.ukaea.uk/papers/conceptual-design-workflow-for-the-step-prototype-powerplant/>
- [IS25] Ansys Twin Builder technical capabilities, <https://www.ansys.com/en-gb/products/digital-twin/ansys-twin-builder>
- [IS26] Siemens Simcenter Executable Digital Twin, <https://resources.sw.siemens.com/en-US/fact-sheet-simcenter-executable-digital-twin/>
- [IS27] Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE SIMULIA, <https://www.3ds.com/products/simulia/3dexperience-simulia>
- [IS28] MathWorks digital twin and reduced-order modelling, <https://www.mathworks.com/discovery/digital-twin.html> ; <https://www.mathworks.com/help/simulink/reduced-order-modeling.html>
- [IS29] NIST AMS 400-2, Use Case Scenarios for Digital Twin Implementation Based on ISO 23247, <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.400-2>

12. 各装置如何使用这些工具

12.1 ITER

ITER 的集成建模以 IMAS 数据字典和 IDS 为关键基础设施，工作流连接平衡、输运、加热、边界和控制。公开的 ITER 学校材料展示 DINA-JINTRAC 对 15 MA、 $Q=10$ 基准场景的集成；SOLPS-ITER 用于边界与偏滤器；JOEKE 用于 ELM、破裂、缓解和壁耦合；DINA、HCD 工作流与部分 IMAS 组件在 2025 年开放发布。使用方式跨越设计预测、控制验证、情景准备和合成诊断，而非一套模型包办。

ITER 的特殊挑战是没有同尺度燃烧等离子体历史数据。验证必须组合现有装置相似性、无量纲标度、跨代码、部件试验和理论约束，并对外推诚实。数字孪生项目不应声称“经 ITER 验证”，除非明确指出是 ITER 设计应用、仿真基准还是未来实验验证。

12.2 JET 与 EUROfusion

JET 长期使用 EFIT/EFIT++ 平衡、TRANSP 和 JINTRAC 解释放电与预测 ITER 场景；JINTRAC 将核心 JETTO、源项和 EDGE2D-EIRENE 边界连接。EUROfusion 的集成建模工作包推动 ETS、IMAS 工作流、JOEKE、边界和多代码 V&V，并以 TSVV 任务组织核心——边界—PFC 等理论、模拟、验证与确认活动。JET 已停运，但其气流数据、诊断和模型经验仍是数字证据资产。

12.3 TCV

TCV 是控制与等离子体形状研究的代表装置。MEQ/LIUQE/FGE/FBT 贯穿放电前轨迹设计、控制器仿真、实时重建与放电后分析，并可与 RAPTOR 等快速输运模型连接。TCV 的价值不只在某个算法，而在同一团队能把模型放进真实控制生命周期。未来项目应学习其测试、部署和回放纪律，同时注意 TCV 尺度、导体与诊断配置不能直接等同于反应堆。

12.4 DIII-D、SPARC 与私营装置

DIII-D 使用 EFIT、TRANSP、OMFIT、TGYRO/TGLF/CGYRO 等形成从重建、实验分析到预测优化的生态；OMFIT 把数据访问、模块和工作流组织起来。基于 DIII-D 数据的机器学习控制、破裂预警和数字孪生研究说明在线潜力，也暴露跨运行周期和装置迁移的分布漂移问题。

SPARC 的公开预测工作使用 TRANSP 与 TGLF/EPED 等形成场景，再用 CGYRO/PORTALS 等做更高保真剖面预测与风险分析。它展示私营项目如何把集成预测、设计裕量和实验前验证结合，但公开论文只覆盖可披露部分。与私营伙伴合作时应把模型可访问性、数据权、出口/知识产权、验证证据和长期可维护性写进接口协议。

12.5 JT-60SA、KSTAR、AUG、EAST 与中国装置

JT-60SA 公开研究使用 DINA 做等离子体建立、线圈/电源和控制研究，并结合 JINTRAC、TRANSP、ETS、TOPICS、ASTRA、CRONOS 等场景工具。KSTAR 使用 EFIT/TRANSP 等分析，并参与 JOEKE 破裂/注入比较。AUG 是 GENE、TGLF、JOEKE、TRANSP 等湍流、MHD 与集成验证的重要数据源。EAST 在长脉冲、边界和控制上提供独特证据，中国装置也发展/使用 EFIT、TRANSP、SOLPS、JOEKE 及本地代码。具体生产版本和数据访问常非公开，项目合作前必须由装置团队确认。

对 HL-2M、EAST、BEST/CFETR 等国内路线，建议不要从“进口代码清单”出发，而从共同基准、数据本体和验证用例出发：先用公开或可授权代码建立可复现基线，再把本地代码作为模型集合成员。这样既能保护知识产权，也能通过同一证据框架比较能力。

12.6 W7-X 与仿星器

W7-X 使用 VMEC 及扩展磁场工具描述三维平衡，EMC3-EIRENE 处理复杂边界和中性粒子；新经典、回旋动力学、波/快离子和合成诊断形成互补。公开验证表明某些工况中径向电场、漂移、横向输运或壁条件会影响边界预测。对数字孪生的启示是：几何本体必须真正支持三维磁面、岛链和非轴对称 PFC，不能把托卡马克二维接口稍作包装即称构型通用。

13. 实验、工程与模拟如何协同

D 可信数字孪生闭环

实验、模型、控制与证据在每次放电中共同迭代

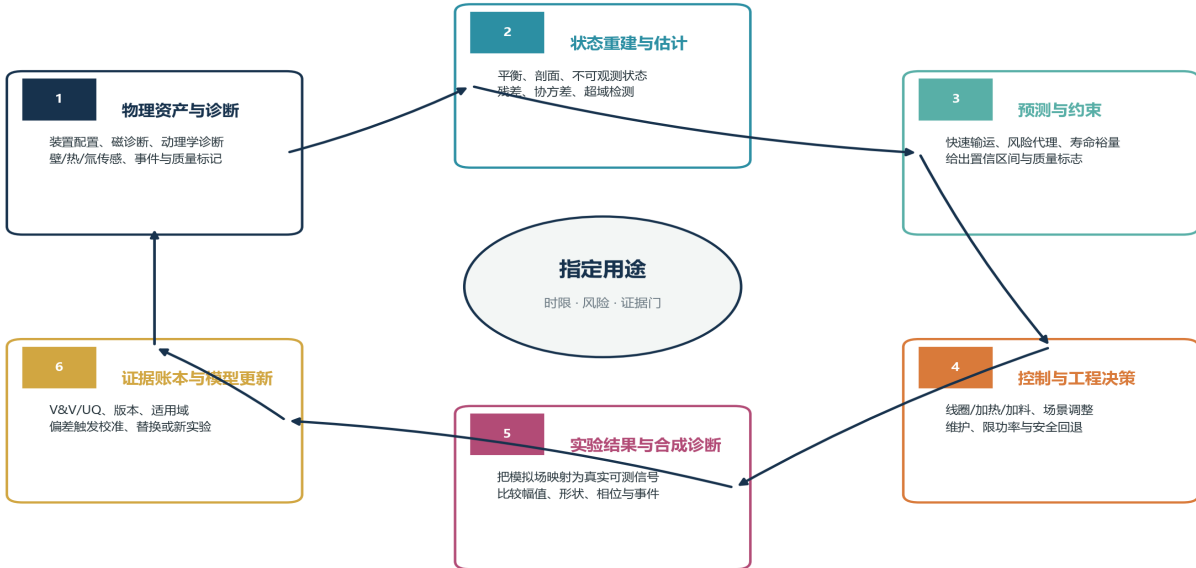


图 17 实验—估计—预测—决策—合成诊断—证据更新闭环。作者绘制。

13.1 实验设计与合成诊断

在实验前，模型用于选择最能区分假设的放电和诊断配置；这比只追求“最优性能”更能提升模型。实验后，不应把模拟场直接与反演后的剖面无条件比较，而应使用 CHERAB、Raysect 或专用合成诊断，把模拟状态通过视线、仪器响应、时间积分、噪声和反演流程转换成观测量。这样可区分物理偏差与测量算子偏差。

建议为每个关键现象建立验证层级：基本守恒/解析解；单效应实验；耦合实验；装置局部观测；整次放电；跨装置；反应堆外推。指标既包含幅值误差，也包含形状、相位、频谱、事件时间、概率校准和多通道一致性。实验数据拆分要避免同一放电的相关片段同时进入训练和测试造成泄漏。

13.2 工程协同

等离子体团队提供的不只是“热流峰值”，还应给空间—时间分布、工况频率、异常事件、坐标和不确定度；工程团队返回温度、形变、电磁响应、材料状态和允许包络。设计变更触发影响分析：几何孔口变化会影响中子屏蔽、磁场误差、真空、诊断视线和维护；模型图谱应自动提示下游重算，而不是依赖会议记忆。

联合评审应围绕“决策与证据包”进行：问题和指定用途；配置基线；模型层级及忽略物理；输入来源；V&V/UQ；结果和裕量；敏感性；适用域；未决风险；独立复核。专家不需要为整个数字孪生背书，只需对其负责的证据与边界签署。

13.3 数据与软件工程

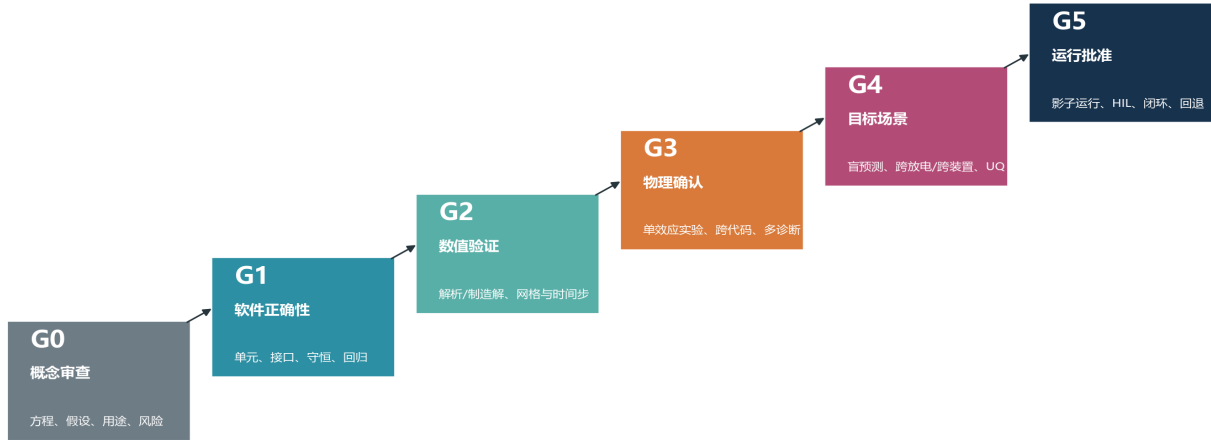
IMAS IDS 可作为科学数据交换骨架，但还需要 API 版本、模式迁移、单位/坐标校验、数据质量、访问控制和长期归档。计算运行应产生机器可读清单：代码提交、容器/编译器、依赖、硬件、随机种子、输入、输出校验和、日志、测试和许可证。对闭源求解器至少保存版本、选项、用户子程序和可合法归档的输入/输出。

CI 不应只编译代码。应包含单元测试、制造解、接口契约、物理守恒、性能/时延阈值、参考结果和数据模式兼容。高成本测试可分夜间/发布级；实时服务每次部署要跑固定回放集。观测性指标包括运行成功率、收敛、质量标记、残差、超域比例、时延分位数、预测校准和模型选择频率。

14. 验证、确认、不确定度与模型可信度

F 模型可信度证据梯

从“能运行”到“可用于指定决策”



证据要求随模型影响和决策后果上升；开源、论文数量或求解收敛都不能自动替代指定用途验证。

图 18 G0—G5 模型可信度证据梯。作者绘制。

“验证（verification）”回答方程是否被正确求解，包括代码验证与解验证；“确认/有效性验证（validation）”回答所选模型在指定用途下是否充分代表现实。校准用数据调整参数，验证用独立数据检验预测；二者混用会夸大可信度。Terry 等关于聚变验证的方法强调验证层级、比较量优先级、测量与模拟误差以及多通道比较。NASA-STD-7009B 和 ASME V&V 10/20/40 提供跨行业的模型管理、CFD/计算固体力学和医疗器械风险框架，可借鉴“上下文用途”和风险分级，但必须结合聚变特性裁剪。

14.1 最低可信度档案

每个模型服务至少要有：唯一名称与版本；所有者/维护者；方程和主要假设；输入输出和单位；数值方法；适用域/禁用域；验证用例和结果；实验确认数据及独立性；不确定度模型；计算资源与时延；已知缺陷；许可证/出口条件；变更记录；指定用途与批准级别。每个代理模型还要保存训练数据谱系、特征、损失、超参数、随机种子、校准和超域检测。

14.2 风险分级

模型可信度要求应与决策后果和模型影响共同决定。用于可视化的温度云图与用于保护阈值的温度预测不应遵守同一流程。可定义四级：探索级用于假设和科研；设计级用于参数筛选但有工程复核；运行支持级影响放电/维护建议并有明确回退；安全关键级进入保护或许可，需要独立 V&V、严格配置和监管接受。升级不是看论文数量，而是看指定用途证据是否闭合。

14.3 常见失败模式

第一，调参后用同一放电宣称预测验证；第二，只报告相关系数而忽略系统偏差和不确定度校准；第三，用跨代码一致替代实验确认；第四，在超出训练域时代理仍输出精确数字；第五，CAD、材料、网格和工况版本错配；第六，把求解器收敛当作物理解正确；第七，忽略负结果和失败初始化；第八，只保存图而不保存输入与版本；第九，闭源商业软件“行业常用”被当作项目验证；第十，AI 将诊断泄漏或控制动作当成因果信号。

14.4 证据闸门

建议设置 G0—G5：G0 概念与方程审查；G1 软件单元/接口和基本守恒；G2 解析/制造解与网格时间步；G3 跨代码和单效应实验；G4 目标装置历史回放与盲预测；G5 影子运行、HIL/闭环和指定用途批准。每次模型或关键数据更新触发受影响闸门重审。闸门状态可直接显示在网站和运行面板中，避免“集成成功”被误解成“物理可信”。

15. AI、代理模型与在线数字孪生

AI 在聚变中的高价值不是替代所有求解器，而是完成四类“压缩”：把昂贵模拟压缩成快速代理；把高维诊断压缩成状态估计；把庞大场景空间压缩成主动学习次序；把异常模式压缩成可操作告警。相应风险是训练分布窄、物理约束被破坏、置信度失校准、数据泄漏、装置间迁移失败和在线漂移。

代理模型可采用高斯过程、稀疏多项式、神经网络、神经算子、降阶基、动态模态分解或混合灰箱模型。选择依据包括样本量、输入维度、是否需要时序稳定、梯度、守恒、可解释性与不确定度。小数据和需要可信区间时，高斯过程/局部代理可能优于深网；高维场映射可考虑神经算子，但必须检验不同网格和几何；控制模型优先保证闭环稳定与最坏时延。

物理信息并不是在损失函数里增加一个方程残差就结束。可以通过硬约束参数化确保正值、守恒和边界；用残差学习只纠正已知模型；用多保真学习融合实验、低保真与高保真；用贝叶斯模型平均表达模型选择；用 conformal prediction 等在有限假设下提供覆盖。对所有方法，都要在真正独立的放电、不同运行周期和可能的跨装置数据上测试。

在线部署采用“监视—限制—回退”三层。监视输入质量、训练域距离、残差和时延；限制输出速率、幅值和动作集合；回退到经验证的传统控制器、保守参考或保护逻辑。AI 模型只能在预先批准的操作设计域内影响控制，不能自行扩大权限。每次预测记录模型版本、输入摘要、置信度、是否超域及最终动作，支持事故复盘。

状态估计是数字孪生的核心。磁平衡、温度/密度剖面、壁温、氦库存和部件损伤都不可被完整直接测量，需要 Kalman/扩展或集合滤波、粒子滤波、变分同化或学习型观测器。估计器必须区分过程噪声和测量噪声，并用创新序列检验；若长期靠放大噪声协方差才能“跟上数据”，说明模型形式或传感器偏差需要处理。

16. 整体技术路线：从控制服务到整厂孪生

G 能力门驱动路线

从控制服务到聚变电厂全生命周期孪生



图 19 由能力门连接的四阶段路线。作者绘制。

阶段 0：共同语言与基线（0—3 个月）

目标不是写大平台，而是冻结第一个可讨论对象。选择一台参考装置和 10—20 个代表性放电/仿真场景；建立线圈、被动导体、诊断、坐标、单位和事件定义；列出 DINA/MEQ 的具体版本、输入输出和许可；定义 IMAS IDS 或项目等价模式；建立模型登记册和证据等级。交付物包括资产包、场景包、接口规范、基准清单、初始差异报告和专家责任矩阵。

成功门槛：任何团队成员可在受控环境中复现至少一个 DINA 和一个 MEQ 结果；主要输出单位/坐标自动检查；运行清单包含代码、依赖和输入校验和；专家能指出两代码差异来自何处而不是“图看起来不同”。这一阶段暂不追求统一 UI 和实时性能。

阶段 1：可信控制模拟服务（3—18 个月）

将 DINA/MEQ 封装为稳定服务，但求解器与配置保持可审计。建立场景创建、批量运行、故障注入、历史回放和结果比较 API；接入控制算法 SIL/PIL/HIL；收集时延分布、初始化失败和收敛质量；建立自动化基准和发布流程。把 LIUQE/EFIT 类重建与预测模型并置，显示估计残差和不确定度。

首批用例：形状/位置控制器设计；线圈/电源限幅分析；垂直稳定与故障恢复；放电前轨迹检查；诊断丢失/偏置；影子运行。阶段能力门：指定控制循环的 P99.9/最坏时延满足预算；固定回放集无未解释退化；控制器在约定扰动包中保持稳定和约束；每项输出有质量标志和安全回退。

组织上需要控制物理负责人、平衡/电路模型负责人、实时软件、数据/IMAS 工程、测试/V&V 和装置运行代表。平台团队不能自行决定物理默认值；领域负责人也不能绕过软件版本和测试直接改生产配置。

阶段 2：等离子体预测孪生（18—36 个月）

接入快速核心输运（RAPTOR、METIS 或经选择的 ASTRA/TRANSP/JINTRAC 工作流）、加热/电流驱动源项、稳定性和边界风险。高保真 GENE/CGYRO、JOEKE、SOLPS、ASCOT/DREAM 不进入毫秒环，而进入离线证据工厂，生成约化模型、风险包络和训练数据。建立状态估计器融合磁、动理学、辐射和壁诊断。

首批端到端用例：放电前预测温度/密度和执行器裕量；在线预测约束冲突；异常场景建议降功率或终止；放电后自动功率/粒子审计；模型偏差驱动下一次实验。能力门：对保留放电集的预测误差、事件提前量和概率校准达标；代理超域检测有效；核心—边界接口满足功率/粒子守恒；专家可追溯每项预测到参考模型与数据。

这一步应避免“大爆炸式耦合”。选择 2—3 个价值最高接口，例如平衡—快速输运、输运—源项、输运—边界热流；每个接口先离线单向、再迭代、最后视必要性在线。只有反馈显著且误差预算证明值得，才加强耦合。

阶段 3：聚变堆多物理孪生（3—5 年）

以统一 CAD/材料/工况配置连接中子源、OpenMC/MCNP 类中子学、FISPACT 活化、FESTIM/TMAP 氦、CFD/系统热工和结构。建立等离子体场景到部件载荷的“载荷翻译器”，把正常脉冲、ELM/破裂、维护和事故组成寿命时间线。接入包层试验、材料照射、热流和氦回路数据。

关键用例：磁体和维护剂量；包层 TBR 与裕量；第一壁/偏滤器寿命消耗；氦库存与泄漏诊断；冷却和结构异常的状态估计；维护窗口与机器人路径。能力门：几何/材料/工况变更可自动追踪影响；守恒账本闭合；关键部件有验证层级和 UQ；寿命建议与检查数据闭环；安全用途与科研用途严格隔离。

阶段 4：聚变电厂全生命周期孪生（5—8 年及以后）

把 PROCESS/FUSE 类系统模型、热功率转换、厂用电、氦工厂、低温、电网、RAMI、成本、备件和运维计划连接。设计阶段用于权衡净电功率、部件寿命和可维护性；调试阶段管理配置和试验；运行阶段进行性能与健康预测；退役阶段规划活化、废物和拆除。

关键用例：场景—寿命—可用率联合优化；功率与电网计划；停机和备件优化；异常根因与恢复方案；设计变更对许可/成本的影响。能力门：系统级能量、质量和成本账本闭合；RAMI 与物理损伤使用同一工况历史；关键结论有独立证据；长期数据、模型和软件可迁移；运营组织接受人机职责和应急回退。

16.1 目标架构

数据平面由 IMAS/科学数据、本体与事件流、CAD/PLM、材料与核数据库、实验/运维时序组成；模型平面包含参考物理、工程物理、运行模型和决策模型；编排平面包含批处理、HPC、实时共仿真、代理注册和状态估计；证据平面包含 V&V、UQ、数据谱系、适用域、审查和电子签署；体验平面提供专家工作台、控制室视图、工程设计空间和管理决策看板。安全/实时域与科研/HPC 域通过受控数据闸门交换，不直接互信。

部署上不宜一开始追求微服务数量。求解器多为大状态、有文件依赖、长运行或 HPC 队列，适合“作业服务 + 不可变运行包”；真正实时的估计和代理服务需要常驻进程、确定调度和硬件绑定。统一 API 可隐藏提交方式，但不能隐藏运行语义。所有结果用内容寻址保存，元数据进入可搜索目录，大型场数据进入对象/并行文件系统。

16.2 优先级与投资组合

优先级采用“决策价值 × 风险降低 × 可验证性 ÷ 集成成本”。DINA/MEQ 控制链价值高、数据近、验证闭环清晰，应优先；三维边界湍流实时化成本高且短期证据不足，应作为离线研发；中子—热—结构和氦账本虽不实时，却是从装置走向堆的关键，应在第二阶段未开始数据准备。

建议将资源分为 50% 近期产品化、30% 中期集成物理、20% 高风险探索，并每半年依据证据调整。HPC 预算按基准/生产/探索分池；任何大计算前先做敏感性和低保真筛选。商业许可预算不仅含席位，还含自动化、集群许可、归档可复现和供应商版本寿命。

16.3 团队与治理

核心组织包括：首席物理/模型官；控制与平衡、核心输运、MHD/破裂、边界/PWI、中子/氦、工程/安全各域负责人；数据本体与科学软件；实时/平台/HPC；V&V/UQ；实验与诊断；系统工程/配置；网络安全与许可/IP。模型负责人对方程和适用域负责，产品负责人对用例与运行负责，V&V 负责人保持足够独立。

建立模型变更委员会和用途批准委员会。模型升级需说明差异、受影响用例、回归、V&V 和迁移；高风险用途批准需明确责任人、回退和审查周期。项目 KPI 不用“接入代码数”，而用可复现运行率、验证闸门通过率、预测校准、时延、异常发现提前量、实验迭代缩短和设计风险减少。

17. 与领域专家讨论的议题清单

与平衡/控制专家：DINA 与 MEQ 各自的权威版本和许可是什么？被动导体、铁磁、线圈/电源时延如何表示？哪些信号用于校准，哪些可独立验证？实时最坏时延在何种硬件上测得？初始化和重建失败如何检测？装置保护与模型建议的权限边界在哪里？

与输运/湍流专家：目标场景中主导输运机制是什么？TGLF/QuaLiKiz 的适用域和已知偏差？高保真数据库如何采样？边界条件和 pedestal 如何给？哪些诊断能形成多通道验证？解释模式和预测模式如何隔离？

与 MHD/破裂专家：需要预测的是事件发生、严重度还是缓解效果？线性边界与非线性数据库怎样转成实时指标？跨代码基准覆盖哪些共同假设？失控电子种子、杂质混合和壁模型是主要不确定度吗？允许的漏报率与提前量是什么？

与边界/PWI 专家：二维异常输运如何校准？中性粒子和壁回收参数证据？脱靶、杂质和热流哪些诊断最关键？核心—边界迭代何时必要？壁演化多久更新一次？三维效应在哪些工况不可忽略？

与中子/氦/材料专家：CAD 清理和材料标记的权威流程？核数据库及协方差版本？TBR 裕量如何分配？活化与维护时间线如何定义？氦陷阱参数在辐照后如何更新？哪些部件试验能最大程度降低系统不确定度？

与工程/安全专家：指定用途对应哪项规范和审查？载荷组合、保守性和模型偏差如何处理？安全模型是否必须独立？数字孪生输出能影响哪些运行决定？长期软件/数据可用性、网络隔离、人员责任和监管接口如何设计？

18. 结论与近期十二项行动

- 冻结一个参考装置、DINA/MEQ 版本和 10—20 个代表场景。
- 发布坐标、单位、线圈、导体、诊断和事件数据字典。
- 建立模型登记册、证据等级和指定用途模板。
- 对 DINA/MEQ 做解析、电路、自由边界和共同场景基准。
- 建立历史回放与 SIL/PIL/HIL 流水线，测最坏时延。
- 接入一种快速输运模型和一个受控源项，先做单向耦合。
- 建立功率、粒子、电流和磁能审计表。
- 选择 JOEKE/DREAM、SOLPS、GENE/CGYRO 等离线证据用例，不追求实时。
- 把合成诊断和独立验证数据写进每个模型计划。
- 从现在开始统一 CAD、材料和工况标识，为中子/氦阶段铺路。

- 建立代理模型训练域、校准和回退标准。
- 每半年用能力门审查路线，停止不能降低决策风险的“集成演示”。

最终应形成一种工作文化：模型不是答案的权威，而是可以被检验、被替换、被组合的证据生产者。DINA 和 MEQ 提供控制与等离子体动态的坚实入口；IMAS/数字线程提供共同语言；高保真物理、工程试验和装置数据共同规定外推边界；系统代码把物理性能翻译为电厂价值。只有当这些层次在同一配置和证据链上闭合，“聚变数字孪生”才从系统集成概念成长为可用于研究、设计、运行和最终许可的工程能力。

附录 A：主要代码与工具分类索引

平衡、重建与控制：DINA、MEQ (FGE/LIUQE/GBT) 、EFIT 家族、FreeGS、FreeGSNKE、CREATE-NL、FIESTA、TokaMaker、GSolve、NICE、EQUINOX、GSfit、CHEASE、HELENA。集成输运/场景：TRANSP、JINTRAC/JETTO、ASTRA、CRONOS、RAPTOR、METIS、ETS、TASK、TOPICS、CORSICA、TGYRO、T3D、FUSE。回旋动理学/湍流：GENE、CGYRO、GS2、GKW、stella、GX、XGC、GTC、ORB5、GYSELA、EUTERPE、TGLF、QualiKiz。新经典：NEO、SFINCS、DKES、KNOSOS、FORTEC-3D。MHD/稳定性：JOREK、M3D-C1、NIMROD、BOUT++、MARS-F、MISHKA、ELITE、NOVA-K、CASTOR3D、MEGA、FAR3D。边界/SOL/PWI：SOLPS-ITER、EDGE2D-EIRENE、UEDGE、SOLEEDGE3X-EIRENE、EMC3-EIRENE、Hermes-3、GBS、TOKAM3X、GRILLIX、EIRENE、DIVIMP、ERO2.0、GITR。波、源项、快离子：ASCOT5、LOCUST、NUBEAM、GENRAY、TORAY、TORBEAM、GRAY、TRAVIS、LUKE、TORIC、AORSA。破裂/失控电子：DREAM、GO、NORSE、SMITER。仿星器：VMEC、DESC、SPEC、PIES、HINT、GVEC、STELLOPT、SIMSOPT、FOCUS、REGCOIL、COILOPT++。中子/活化：OpenMC、MCNP、Serpent、TRIPOLI-4、DAGMC、FISPACT-II、ALARA。氦/材料：FESTIM、TMAP8、Xolotl、LAMMPS、Quantum ESPRESSO、VASP。工程：OpenFOAM、FreeMHD、ANSYS Fluent/CFX/Mechanical、COMSOL、Abaqus、STAR-CCM+、CalculiX、Code_Aster、Elmer、MOOSE/Cardinal、RELAP5-3D、MELCOR Fusion、Modelica/PBM。系统/整厂：PROCESS、SYCOMORE、ARIES Systems Code、FUSE、pyFECONS、BLUEPRINT/BlueMira。数据/工作流/合成诊断：IMAS、OMFIT、OMAS、IPS、CHERAB、Raysect、Pyrokinetics、duqtools、Dakota、EasyVVUQ。惯性约束与其他路线概览：HYDRA、LASNEX、xRAGE、FLASH-X、MULTI-IFE、MACH2。

附录 B：术语速查

平衡重建：由诊断反演等离子体磁平衡；自由边界：等离子体边界由等离子体与外线圈/导体共同决定；输运：粒子、能量、动量和电流在时间与空间中的演化；回旋动理学：平均掉快速回旋运动后的动力学理论；MHD：把等离子体近似为导电流体；SOL：最后闭合磁面外、连接壁/偏滤器的刮削层；PWI：等离子体—壁相互作用；脱靶：偏滤器前的强辐射/复合使靶板热粒子负荷降低；TBR：氦增殖比；RAMI：可靠性、可用性、可维护性、可检查性；V&V：验证与确认；UQ：不确定度量化；适用域：模型证据支持的输入、状态和用途范围；合成诊断：将模拟状态经过仪器/观测模型转成可与实测直接比较的信号；影子运行：模型在线接收真实数据但不控制资产；数字线程：跨设计、制造、试验、运行和退役保持配置与证据关联的数据链。

参考文献（核心）

[R1] ITER Organization. *Release of IMAS infrastructure and physics models as open source*, 2025. [R2] ITER International School. *Integrated modelling of ITER scenarios*, 2025. [R3] U.S. DOE. *Fusion Energy Sciences & Technology Roadmap*, 2026. [R4] Patterson et al. *An integrated digital framework for fusion power plant design*, Royal Society Open Science, 2019. [R5] FUSE team. *FUSE: A framework for integrated fusion engineering*, arXiv:2409.05894, 2024. [R6] Felici et al. *MEQ: a tool suite for tokamak equilibrium and control*, IAEA FEC, 2026. [R7] TRANSP team. *TRANSP: a code for integrated transport analysis*, CPC / arXiv:2406.07781. [R8] Hoelzl et al. *The JOEKE non-linear extended MHD code and applications*, Nuclear Fusion, 2021. [R9] Hoppe et al. *DREAM: a fluid-kinetic framework for runaway electrons*, CPC, 2021. [R10] ASCOT5 team. *ASCOT5: orbit-following Monte Carlo code*, CPC, 2019. [R11] Terry et al. *Validation in fusion research*, Physics of Plasmas, 2008. [R12] NASA. *NASA-STD-7009B: Standard for Models and Simulations*, 2024. [R13] UKAEA. *Conceptual design workflow for the STEP prototype powerplant*, 2024. [R14] UKAEA. *PROCESS systems code repository and documentation*. [R15] EUROfusion. *Integrated modelling workflows and TSVV programme*. [R16] SPARC team. *Profile prediction with CGYRO/PORTALS*, arXiv:2403.15633, 2024. [R17] Dudson et al. *Hermes-3 multi-component plasma model*, 2023. [R18] FESTIM team. *Verification and validation of FESTIM*, Nuclear Fusion, 2024. [R19] UKAEA. *FISPACT-II validation database and reports*. [R20] EPFL Swiss Plasma Center. *TCV plasma control*.

完整 URL、开放获取 PDF、本地文件名、许可/访问状态和补充资料见配套网页与 `literature-manifest.csv`。原始论文图均保留来源和许可说明；新增装置剖面和多尺度图采用 imagegen 制作科学图版底图，其余架构、矩阵和路线图由可复现代码绘制。全部示意图仅用于技术解释，不作为工程几何、性能数据或安全边界。

附录 C：代码选型、复杂度与应用效果详表

C.1 如何理解“应用效果”

聚变代码很少能用一个统一排行榜评价。平衡重建的效果可能是磁诊断拟合、边界误差和实时稳定性；湍流代码是多通道通量、剖面与波动谱；MHD 是模式结构、事件时间和载荷；中子学是响应与实验基准；系统代码是约束闭合和设计决策稳定性。公开论文中的一次成功复现实验只证明该版本、配置、输入和观测量下的能力，不代表所有装置、所有工况或未来反应堆。

建议对候选工具按十项打分但不简单加总：物理覆盖、指定用途证据、数值鲁棒性、计算资源、实时/批处理适配、数据接口、软件质量、许可/IP、维护生态、人才可获得性。对于安全或控制用途，“硬性淘汰项”比总分更重要，例如无最坏时延证据、无法冻结版本、许可证不允许部署、无法输出质量标记、关键假设与目标工况冲突。

C.2 平衡与控制工具比较

DINA：目标是轴对称自由边界等离子体—输运—电路—控制联合演化；适合放电建立、形状/位置、垂直事件、PF 系统和场景研究。复杂度通常为 Fortran/C 类遗产科学代码与装置配置结合，可达到控制设计所需的快速程度但非完整三维实时物理。验证依赖解析/简化问题、跨自由边界代码、装置场景与控制回放。公开应用覆盖 ITER、JT-60SA 等。优点是动态系统完整，风险是分支/配置、文档与装置专用知识。

MEQ：目标是以一致工具链覆盖自由边界演化 FGE、重建 LIUQE 和轨迹设计 FBT；适合 TCV 式放电全生命周期和控制服务。Matlab/C 技术栈利于算法迭代和实时 C 路径，公开材料强调测试覆盖和可预测部署。装置内闭环应用是强证据，但移植需重建导体、诊断、电源和时延模型。MEQ 与 DINA 的最佳关系是共同基准和模型集合，而非过早二选一。

EFIT 家族：目标是平衡重建和部分预测/实时任务；装置覆盖极广，是数据分析事实标准之一。不同机构分支在约束、求解、实时性和接口上差异大，必须用完整名称、提交和配置标识。其应用效果来自大量放电，但重建拟合不是独立真值，应结合 MSE、动力学约束、合成诊断和误差分析。

FreeGS/FreeGSNKE/TokaMaker：开源、易自动化，适合原型、教育、设计扫描和独立基准。Python 或现代 C++ 生态降低平台集成门槛；高价值是透明和可测试，而非宣称取代生产重建。CREATE-NL、FIESTA、GSevolve 具有长期控制/设计经验，但公开性和授权随版本、机构而异；合作前要确认可部署代码而不是只依据论文名称。

C.3 集成输运工具比较

TRANSP: 目标是实验解释、功率/粒子核算和综合预测, 模块广且装置数据库经验深。计算从单次中等作业到含蒙卡源项的大批量 HPC; 技术栈以 Fortran 核心、Python/工作流和现代 CI 逐步结合。验证包括模块基准、历史回放、跨代码与大量装置分析。优点是集成深度与诊断语境, 难点是配置复杂、专家依赖和解释/预测模式边界。

JINTRAC: 目标是核心—边界—源项的欧洲集成场景, 适合 JET/ITER/DEMO 预测。JETTO 与 EDGE2D-EIRENE 等耦合可研究核心到偏滤器功率链; 复杂度高、运行成本随耦合显著增长。其应用效果体现在 JET 解释和 ITER 场景研究, 但边界输运系数和模型选择仍是重要不确定度。

ASTRA/CRONOS/ETS/TOPICS/CORSICA: 分别在不同装置、地区和 IMAS 工作流中积累。选型重点是目标团队是否有权威配置和长期维护, 而非泛泛比较论文引用。RAPTOR/METIS 更适合快速预测、控制和大扫描, 但物理约化更强; 应由 TRANSP/JINTRAC/高保真模型和实验约束其适用域。TGYRO/T3D 强调与准线性或回旋动理学通量闭合, 适合高保真剖面预测, 计算成本和收敛管理更高。

C.4 湍流与新经典工具比较

GENE、CGYRO、GS2、GKW、stella 是成熟回旋动理学代表, 通常使用 Fortran/C++、MPI, 部分支持 GPU。局部线性作业可在较小资源运行, 非线性多物种电磁扫描可能需要大规模集群。验证从标准算例、跨代码到 AUG/DIII-D/JET 等多通道实验。GENE 生态与全局能力丰富; CGYRO 与 TGYRO/PORTALS 和美国装置工作流结合紧密; GS2 历史基准广; stella 面向通量管和仿星器几何; GX 使用现代 GPU/谱方法追求高性能。

XGC、GTC、ORB5、GYSELA、EUTERPE 处理全局、边界、粒子或三维问题, 资源和数据复杂度更高, 不适合常规在线调用。其价值是揭示局部/约化模型失效、提供极端工况和非局部效应。TGLF、QualiKiz 把动力学知识压缩成输运可调用模型, 应用效果应以剖面预测而非单点通量判断。NEO、SFINCS、DKES、KNOSOS 处理新经典和 bootstrap 电流; 三维构型中碰撞率与磁几何适用域尤为关键。

C.5 MHD、边界与破裂工具比较

JOREK、M3D-C1、NIMROD 均可处理非线性扩展 MHD, 但离散、方程、壁/真空和输运模型不同。大型三维事件需要 HPC、精细初始化和专家诊断, 单次运行可能从小时到数周。公开跨代码 VDE、SPI 等比较是宝贵证据。JOREK 的公开综述和欧洲/ITER 应用广; M3D-C1 在 DIII-D/美国生态和高连续有限元上有优势; NIMROD 在谱元与多构型研究中经验丰富。BOUT++ 更像可组合方程框架, Hermes-3 等具体模型的验证不能由框架名称替代。

MARS-F、MISHKA、ELITE、NOVA-K 等线性/谱工具速度更快, 适合稳定边界和大扫描。它们与非线性代码形成漏斗: 先筛风险, 再对少量高风险点做昂贵计算。DREAM 在失控电子电流演化和动理学之间折中, C++/Python、开源和明确验证链利于自动化; 主要风险是几何/输运/混合模型与反应堆外推。GO/NORSE/SMITER 提供不同维度和壁载荷互证。

SOLPS-ITER 是二维边界设计主力, 物理覆盖强但收敛、网格和经验输运系数需要专家; EDGE2D-EIRENE 有 JET/JINTRAC 数据链; UEDGE 便于美国生态和快速研究; SOLEDGE3X/EMC3-EIRENE 处理三维; Hermes-3/GBS/TOKAM3X/GRILLIX 用于湍流和机理。应用效果必须以多诊断同时比较, 不能只匹配一条靶板曲线。

C.6 中子、氚与工程工具比较

OpenMC 的开源 C++/Python、HDF5 状态点和自动建模适合数字线程; 融合基准仍在持续扩展。MCNP 具有深厚验证与用户体验, 但许可、出口和自动部署条件需提前解决。Serpent 高效且生态成熟, 授权并非完全开放; TRIPOLI-4 有 CEA 验证资产和特定访问。选型应运行同一 CAD 简化与真实模型, 比较几何处理、方差缩减、核数据和响应, 而不是只比较每秒粒子数。

FISPACT-II/ALARA 处理活化, 关键技术栈问题是核数据库、材料组成和时间历史, 不是前端语言。FESTIM 适合以 Python/FEniCS 组织氚扩散—热耦合和 V&V; TMAP8 利用 MOOSE 的多物理和测试基础; 二者可用共同制造解与实验做集合。Xolotl/LAMMPS/DFT 工具研究缺陷和原子尺度参数, 不能把短时小尺度直接当部件寿命, 需不确定度明确的跨尺度上采样。

OpenFOAM 开源、可定制, 适合建立透明 CFD/MHD 工作流, 但项目自行承担模型验证和维护; ANSYS/COMSOL/Abaqus/STAR-CCM+ 集成和支持成熟, 适合复杂工程协作, 但闭源求解器仍需网格、基准和脚本审计; Code_Aster/CalculiX/Elmer 提供开放结构/多物理替代。RELAP/MELCOR 类系统安全代码有长期核工业语境, 但聚变特有部件与源项需确认和验证, 不能直接继承裂变认可。

C.7 系统平台与 workflow 比较

PROCESS 适合快速整厂约束与优化，Python 开源化使 CI、敏感性和组织协作更容易；精细物理仍需外部模型。FUSE 以 Julia、IMAS 本体和多保真模块形成现代研究架构，适合一体化优化与代理，但相对年轻，生产验证和人才生态需建设。ARIES/SYCOMORE 提供长期系统研究经验，具体代码访问与维护要逐项核实。BLUEPRINT/BlueMira 连接参数化几何和工程 workflow，价值在配置一致性而非替代求解器。

IMAS 解决数据语义和集成基础；OMFIT 擅长装置数据和工作流应用；OMAS 提供 IMAS 风格 Python 对象与映射；IPS 面向耦合 HPC；CHERAB/Raysect 生成诊断；Dakota/EasyVVUQ/duqtools 支持参数、UQ 和工作流。平台选型可组合：IMAS 作为本体，OMFIT/自研门户作为专家体验，HPC 编排服务提交代码，证据库独立管理。不要要求单个平台同时成为数据湖、实时总线、HPC 调度、PLM 和安全系统。

C.8 推荐的实际选型试验

第一轮用两周完成纸面门槛：许可、平台、维护、指定用途和现有证据。第二轮用四到八周完成共同基准：固定输入、容器/环境、自动审计和专家盲评。第三轮用一到两个季度完成历史放电/部件试验：预先定义指标、冻结参数、保留盲数据。第四轮才做集成原型和性能优化。每轮允许淘汰，不把沉没成本当作技术优势。

基准结果发布“模型卡 + 证据卡”：代码和配置；问题；输入来源；数值设置；运行成本；失败率；结果及不确定度；与实验/其他代码的差异；已知局限；推荐用途。这样专家争论可以定位到假设、数据或算法，不会退化成代码品牌之争。

原始论文图补充

M Hoelzl, GTA Huijsmans, SJP Pamela, M Becoulet, E Nardon, FJ Artola, B Nkonga et al – JOREK non-linear MHD code

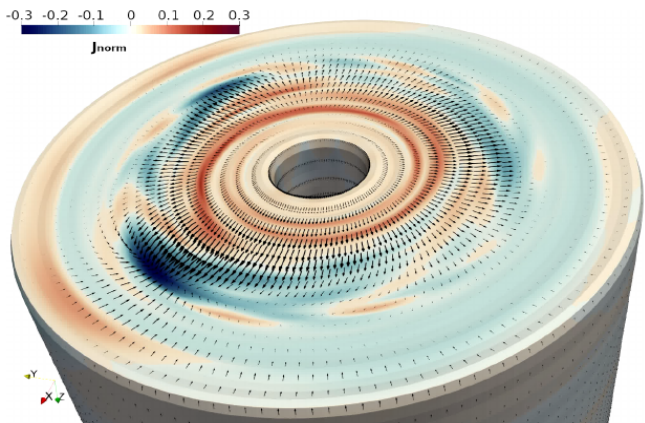


Figure 2. – Bottom view of the thin wall used for the 3D VDE benchmark case published in Ref. [99] showing the distribution of source/sink (halo) currents (black arrows). The colors indicate the perpendicular current density into the wall respectively out of it (in a.u.). The B.C. for the electric potential was $\Phi = 0$ here such that the wall acts ideally conducting for the halo currents.

coils, etc.) consistently in JOREK-STARWALL simulations. A functionality is available also, which allows to create a free boundary equilibrium for a given fixed boundary case, by automatically determining appropriate coil currents [93].

图 A-1 JOREK-STARWALL 壁/真空耦合。来源：JOREK 综述开放预印本。

版权与使用说明：原始论文图按其开放获取许可或预印本传播条件用于研究说明，并标示来源；配套网站提供原始出处。新增装置剖面和多尺度图采用 imagegen 制作科学图版底图，其余架构、矩阵和路线图由可复现代码绘制；全部示意图不表示真实工程尺寸、材料、性能或安全边界。