



力学进展
Advances in Mechanics

AI + 聚变: 全球能源格局变革的重要机遇

梁云峰

AI + Nuclear Fusion: A Crucial Opportunity for the Transformation of the Global Energy Pattern

LIANG Yunfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/1000-0992-25-045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号，获得更多资讯信息

AI + 聚变: 全球能源格局变革的重要机遇

梁云峰*

于利希研究中心聚变能与核废料管理研究院等离子体物理研究所, 德国

摘要 人工智能 (AI) 的崛起, 尤其在算法优化和大规模数据处理等方面跨越式的能力提升, 为人类解决能源危机提供了全新路径. 核聚变作为未来终极能源形式, 历经 70 余年发展已从基础研究迈向商业化临界点. 本文系统阐述了全球核聚变研究的发展现状与核心挑战, 深入分析了 AI 技术在核聚变装置控制、数据处理、模型优化、风险防控等关键领域的应用场景与实践成果, 探讨了 AI 与核聚变融合对全球能源格局的变革性影响, 最后展望了该领域的未来发展方向与行业布局, 为推动能源革命与科技进步提供参考.

关键词 人工智能, 核聚变, 能源格局, 托卡马克, 仿星器, 智能控制, 代理模型

中图分类号: 文献标识码: A

DOI: [10.6052/1000-0992-25-045](#) CSTR: [32046.14.1000-0992-25-045](#)

收稿日期: 2025-12-31; 录用日期: 2026-04-07; 在线出版日期:

* E-mail: y.liang@ipp.ac.cn

引用方式: 梁云峰. AI + 聚变: 全球能源格局变革的重要机遇. 力学进展, 待出版

Liang Y F. AI + Nuclear Fusion: A Crucial Opportunity for the Transformation of the Global Energy Pattern. *Advances in Mechanics*, in press

© 2026 《力学进展》版权所有

1 引言

AI 技术的爆发式发展在很大程度上得益于算法的创新和算力的突破性提升,从 AlphaGo 击败人类围棋顶尖选手这一标志性事件起 (Silver et al. 2016), 其在大数据处理、优化决策等领域的优势日益凸显, 已广泛渗透到医学 (Esteva et al. 2017)、生命科学 (Townshend et al. 2021)、制药 (Wang et al. 2024)、化学材料 (Xiao et al. 2025) 等多个学科. 然而, AI 技术的持续演进高度依赖能源支撑 (IEA 2025), 算力规模的指数级增长带来了巨大的电力需求, 图 1 展示了全球数据中心能源消耗的持续上升趋势, 直观反映了这一压力. 这一矛盾推动着人类向终极能源形式——核聚变寻求解决方案.

核聚变能源具有清洁、高效、燃料储量丰富等无可比拟的优势, 被视为解决全球能源危机的终极方案. 自 20 世纪 50 年代初起步以来, 磁约束核聚变研究历经波折, 如今已进入关键发展阶段: 装置技术不断突破, 产业链逐步完善, 商业化应用曙光初现. 与此同时, AI 技术与核聚变研究的深度融合, 正成为破解核聚变复杂物理难题、加速技术迭代的关键驱动力, 为全球能源格局变革带来了历史性机遇.

2 磁约束核聚变研究现状与发展态势

2.1 发展历程与主流技术路线

磁约束核聚变研究已走过 70 余年历程, 形成了以托卡马克 (Tokamak) 和仿星器 (Stellarator) 为核心的两大主流技术路线. 早期核聚变装置以美国普林斯顿大学斯皮策 (Lyman Spitzer) 教授的 Figure-8 装置为代表 (Goldman et al. 1953, Spitzer 1981), 成为磁约束聚变的雏形, 其通过外部线圈产生磁场约束高温等离子体的设计理念, 为后续装置发展奠定了基础.

托卡马克装置因参数优势成为过去数十年聚变研究的主流 (Peacock et al. 1969), 其形状类似轮胎, 需要通过外部纵场线圈、垂直场线圈, 以及等离子体电流协同作用产生磁场约束等离子体. 目前全球代表性托卡马克装置包括日本 JT-60SA (世界最大超导托卡马克, 等离子体体积达 160 立方米) (Tomarchio et al. 2017)、美国 DIII-D (Fenstermacher et al. 2022)、中国东方超环 (EAST) (Li et al. 2013) 等. 仿星器则以更复杂的外部线圈结构形成闭合磁面, 德国 Wendelstein7-X (Klinger et al. 2019) 作为世界最大仿星器, 由 50 个非平面线圈、20 个平面线圈、以及 5 个误差场修正线圈和 10 个磁岛偏滤器控制线圈组成, 可产生和调控稳定约束磁场, 且具有无需等离子体电流参与约束的优势. 图 2 展示了两类典型磁约束装置的概念示意图, 以便对其基本位形进行直观比较: (左) 托卡马克, (右) 仿星器.

中国磁约束聚变研究早期经历了多代中小型托卡马克装置持续迭代 (Zheng et al. 2022), 实现了关键技术积累并完成了人才队伍建设. 其后, 中国科学院等离子体物理研究所在成功研制 HT-7 超导托卡马克 (Li et al. 2003) 的基础上, 推动了先进实验超导托卡马克 EAST 的建造与运行, 其目标面向长脉冲稳态高性能运行. 与此同时, 西南物理研究院形成了 HL 系列托卡马克的连续发展路线, 其于 2020 年投运的 HL-2M (后更名环流器 3 号 HL-3) (Zhong 2024) 主要面向高辅

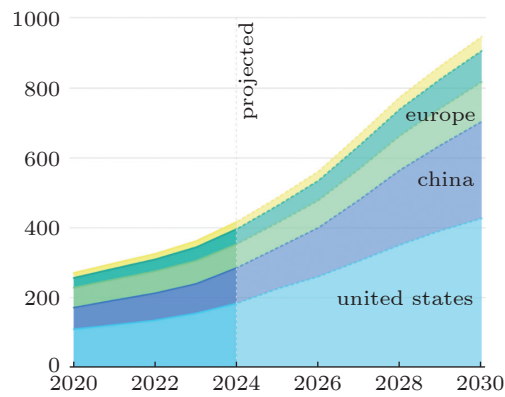


图 1

全球数据中心能源消耗 (IEA 2025)

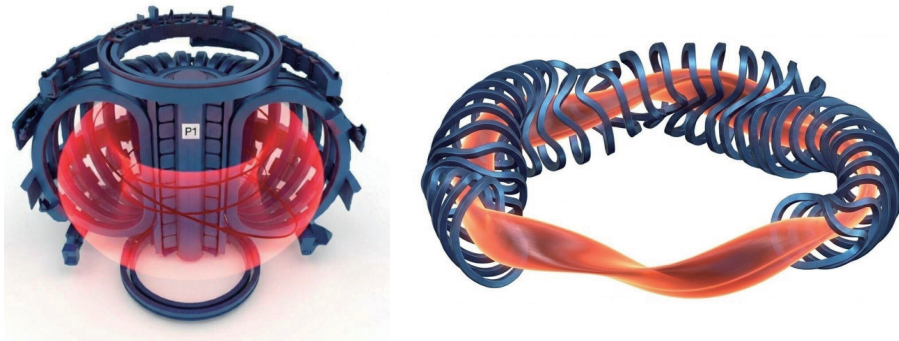


图 2

(左) 托卡马克和 (右) 仿星器装置概念图

助加热功率条件下的高性能等离子体物理开展研究. 除托卡马克装置外, 国内也在推进仿星器路线探索, 例如西南交通大学牵头建设的 CFQS (中国首台准轴对称仿星器)(Cheng et al. 2025) 旨在验证准轴对称磁位形在约束等离子体方面的固有优势.

2.2 关键技术突破与实验成果

近年来, 核聚变研究取得一系列里程碑式突破. 欧盟 JET 托卡马克装置实现了氘-氚热核聚变能产出 69 兆焦的磁约束聚变实验 (Kappatou et al. 2025), 将高参数氘-氚等离子体维持近 5 秒, 证明了长时间维持高参数热核聚变等离子体的可行性, 为聚变堆稳态运行奠定了基础. 目前, 世界上已有多个大型托卡马克装置实现了接近氘-氚聚变自持的“三乘积”参数要求, 其中包括美国 TFTR (Meade 1988), 欧盟 JET 和日本 JT-60U (Fujita et al. 1999).

在长脉冲稳态运行模式发展方面, 自上个世纪末开始, 随着低温超导技术被引入磁约束聚变研究, 日本 TRIAM-1M (Itoh et al. 1999), 中国 EAST、韩国 KSTAR (Ko et al. 2024)、法国 TORE-SUPRA (Pamela 1999)/WEST (Bucalossi et al. 2022)、日本 JT-60SA 等超导托卡马克装置, 和

日本大型螺旋装置 LHD (Komori et al. 2000)、德国 Wendelstein 7-X 等超导仿星器装置陆续成功建成并开展实验研究, 为高约束稳态运行模式的发展研究奠定了重要基础 (图 3 展示了 JT-60SA 超导托卡马克概念图及其与其他超导托卡马克装置的比较). 其中, 德国 Wendelstein 7-X 仿星器装置已验证了降低新经典输运的位形优化, 并实现了等离子体中心比压 5% 以上, 聚变三乘积参数已达到与中大型托卡马克相当的 $7 \times 10^{19} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 量级参数水平 (Fleschner 2025).

另外, 在长脉冲稳定控制技术方面, 日本 TRIAM-1M 装置实现了两小时限制器位形放电 [21], 法国 WEST 实现了 1337 秒偏滤器位形稳定运行 (CEA 2025), 德国 Wendelstein 7-X 装置不仅实现了 360 秒 1.8G 焦的高参数稳态等离子体运行, 还刷新了在长时间运行下 (43 秒) 的三乘积参数 (Fleschner 2025).

中国装置也取得了一批具有代表性的成果. 例如, EAST 实现了 1066 秒高约束模式等离子体稳态运行 (Song et al.), HL-3 则在高参数运行与先进模式探索方面进展显著, 实现离子温度与电子温度同时达到“亿度量级”的高参数放电 (Zhong et al. 2026), 并在偏滤器位形与高电流等离子体运行方面取得阶段性成果 (Zhong 2024).

以上这些成果标志着磁约束核聚变装置向稳态运行迈出了关键步伐. 这些突破不仅验证了核聚变的科学可行性, 更为商业化应用提供了核心技术支撑.

2.3 商业化进程与产业链发展

近年来, 核聚变研究已从传统基础研究转向商业化推进阶段, 全球市场对核聚变的关注度持续提升, 产业链逐步完善. 在相关政策推动下, 中国核聚变产业链发展迅速, 形成了较为完整的产业生态, 并涌现出一批聚变相关私营企业, 例如新奥集团 (Liu et al. 2024, Shi et al. 2025)、星环聚能 (Tan et al. 2025a, Tan et al. 2025b) 等; 这些企业正围绕各自技术路线开展装置验证与工程化探索. 全球 80% 以上的私人聚变企业将目标锁定在 21 世纪 30 年代实现商业化应用, 这一趋势推动着聚变技术从实验室走向产业界, 为能源市场带来全新变革.

当前全球已涌现多个下一代聚变堆设计方案, 包括英国 STEP (Anand et al. 2023) 球形环装置 (采用 Super-X 偏滤器设计)、美国 Commonwealth Fusion Systems (与 MIT PSFC 合作) 的 ARC (Sorbom et al. 2015) 装置、中国 CFETR (中国聚变工程示范堆)(Ding et al. 2025) 相关方案以及德国马普研究所设计的大型仿星器聚变堆 HELIAS (功率达 3GW)(Andreeva et al. 2004), 这些设计均聚焦于工程化与商业化落地, 推动核聚变技术加速迭代.

3 核聚变研究面临的核心挑战

3.1 安全风险防控难题

托卡马克核聚变装置运行存在较高安全风险, 其中破裂 (Disruption)(De Vries et al. 2009, Liang et al. 2007) 是其首要风险. 在十几兆安级大电流装置中, 破裂时等离子体热能和电磁能会在数百微秒内快速耗散, 不仅会产生大量兆 eV 能量级的逃逸电子, 还会在偏滤器靶板和第一壁上沉积极大的局域热流, 以及在装置本体和内部部件上产生极大的对称和非对称的电磁应力, 如

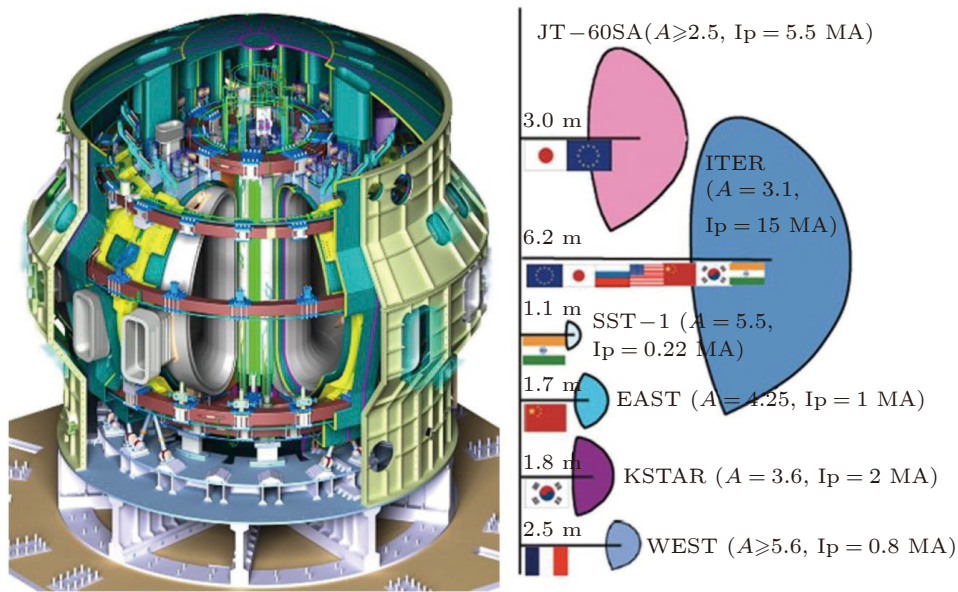


图 3

JT-60SA 概述及其与其他超导托卡马克装置的比较 (Tomarchio et al. 2017)

JET 装置在 4 兆安等离子体电流运行时，每次破裂的冲击相当于一次小型地震，可能导致靶板碎裂等严重设备损坏。边界局域模 (Edge Localized Modes) (Igochine 2015, Liang et al. 2007) 是仅次于破裂的第二大风险，相较于低约束模式 (L 模) 较为平滑的压强分布，高约束模式 (H 模) 下，边界输运垒的形成使等离子体压强分布在边缘建立“台基” (pedestal)，从而导致边界压强梯度显著增大 (如图 4 所示)；该高梯度状态及伴随增强的边界电流易触发磁流体动力学不稳定性，进而引发等离子体压强分布边界台基周期性的崩塌，每次崩塌将在数百微秒内出现极高功率在偏滤器靶板很窄的区域内沉积，对装置偏滤器材料寿命构成严峻考验。

3.2 复杂物理问题与控制挑战

核聚变涉及的非线性物理现象极为复杂，湍流与磁场的耦合问题被称为“双重世界之谜”，传统理论难以准确描述。等离子体的约束性能、输运特征受多种因素影响，其动力学行为具有高度复杂性，给装置控制带来巨大挑战 (Waltz et al. 1994)。如图 5 所示，湍流会与纬向流 (zonal flow) 发生主导性的非线性相互作用，一方面湍流驱动大尺度剪切流，另一方面剪切流又会反过来剪切并抑制湍流结构。另外，托卡马克装置的等离子体电流参与约束平衡，导致其具有较强的自组织化效应，进一步增加了控制难度；而仿星器的线圈结构高度三维化，线圈在通电后承受电磁力作用易出现形变，同时在高性能等离子体中，等离子体压力对磁场产生明显的反作用，引入 Shafranov 位移和边界磁拓扑变化，从而影响约束效果 (Zhou et al. 2022)。以 Wendelstein 7-X 为例，在高旋转变换 (high iota) 位型下，随有限比压 (β) 升高边界磁岛结构被明显侵蚀并出现更强随机化 (如图 6 所示)。

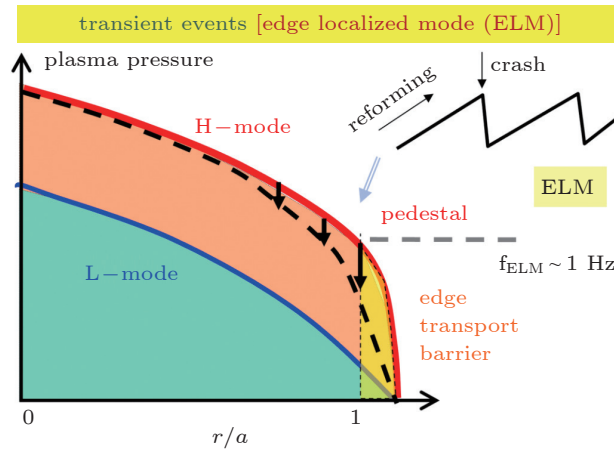


图 4

托卡马克 L 模与 H 模等离子体的压力分布及边界局域模崩塌特征示意图 (Igochine 2015)

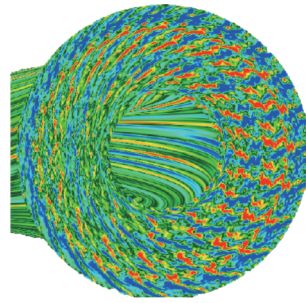


图 5

托卡马克等离子体湍流涡旋与极方向纬向流之间的主导性非线性相互作用 (Waltz et al. 1994)

3.3 第一壁材料的关键瓶颈

在反应堆相关工况下, 等离子体面对部件 (PFCs) 必须在苛刻环境中实现长期可靠运行 (Linke et al. 2019): 一方面需在准稳态阶段承受高热流密度 ($\sim 20 \text{ MW/m}^2$), 并叠加由边界局域模 (ELM) 等引起的强瞬态热冲击 (峰值可达 GW/m^2 量级); 另一方面还要经受粒子的持续轰击, 以及能量约 14 MeV 中的聚变中子辐照. 等离子体-材料相互作用 (PMI) 所引发的溅射、迁移与再沉积会不断改变壁面成分与粗糙度, 导致杂质进入等离子体、辐射损失增加并可能引起约束性能退化. 与此同时, 燃料同位素 (尤其是氦) 在第一壁材料中的滞留问题也是不得不考虑的问题之一. 降低碳基材料共沉积导致的高氦滞留, 是 ITER 等装置倾向采用金属壁的重要动因之一. 截至目前, ITER 将钨视为高热流区域 (如偏滤器) 关键候选材料, 但其低温脆性以及热负荷循环下的寿命限制仍需重点解决; 同时, 全金属壁仍可能通过缺陷俘获与向冷却回路渗透等机制加剧氦滞留问题.

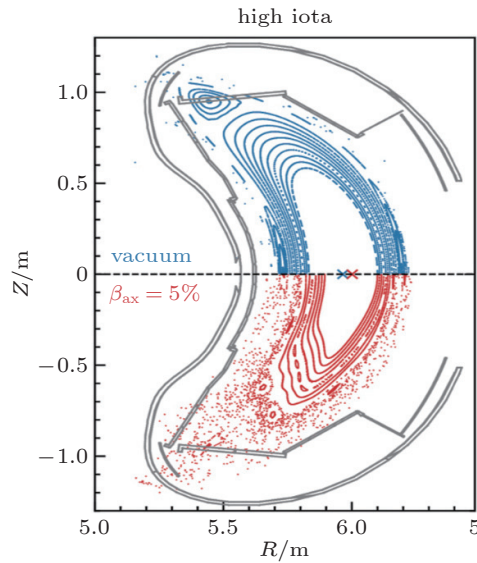


图 6

W7-X 高旋转变换位形真空条件磁拓扑 ($Z > 0$: 蓝色) 与有限比压平衡条件磁拓扑 ($Z < 0$: 红色) 的庞加莱图。X 形十字分别标示磁轴在豆形平面中的位置。灰色线条表示偏滤器和挡板的容器内组件。(Zhou et al. 2022)

3.4 氦自持与包层挑战

氦自持与燃料循环被普遍认为是 D-T 托卡马克走向聚变电站的“硬约束”，其根源在于外部氦资源规模有限，难以长期支撑商业堆的连续运行，因此必须依赖含锂增殖包层在堆内增殖氦并闭合燃料循环 (Abdou et al. 2021)。然而，包层作为强耦合系统，其设计既要保证足够的中子经济性以实现氦增殖并留出裕度，又要在 14MeV 中子辐照与高热负荷条件下保持结构与材料的长期可靠性，并同时 将氦提取、渗透控制与库存管理纳入闭环以满足安全许可约束 (Abdou et al. 2015)。进一步地，对于几何更为复杂、线圈与结构遮挡更显著的仿星器装置，包层在有限空间内实现高覆盖率，并兼顾维护可达性与工程集成，将面临更严苛的设计挑战。

3.5 数据处理与模型计算压力

随着长脉冲实验的开展，核聚变研究产生的数据量呈指数级增长。小时量级的实验若以毫秒级精度测量，再结合二维相机等诊断设备，会产生海量数据，传统数据处理方法已无法满足需求。同时，核聚变堆设计依赖物理模型外推，但聚变等离子体物理模拟复杂，现有物理模型计算耗时极长，部分模型需数天甚至数月才能完成一次计算，难以匹配工程迭代的快速需求，成为制约技术推进的关键瓶颈。

3.6 技术转化与验证瓶颈

核聚变技术从实验室走向商业化应用，面临着技术转化与实验验证的多重挑战。现有物理模型与实验数据存在外推难题，基于小型装置实验建立的模型难以直接应用于大型聚变堆；数据质

量参差不齐,部分关键实验数据缺失或可靠性不足;现有实验定标律的可靠性与控制技术的稳定性仍需通过大量实验验证,尤其是在极端物理条件下的适用性,仍需长期探索.

4 AI 在核聚变研究中的关键应用

AI 技术已经广泛运用于聚变研究中,图 7 总结了聚变能源研究中 AI 技术的六个主要应用方向,下面将展开介绍.

4.1 等离子体智能控制

AI 技术为等离子体控制提供了全新解决方案.瑞士 TCV(Degrave et al. 2022) 装置通过 AI 实现了等离子体任意设计位型的精准控制,控制效果远超人工操作,也成功避免了人为误差,满足聚变实验对稳定性的严苛要求(如图 8 所示).在等离子体撕裂模不稳定性控制方面,美国 DIII-D (Seo et al. 2024) 装置上的研究人员基于多诊断系统和执行器的信号,开发了一种多模态动态模型来评估撕裂模不稳定性发生的概率,并将其作为强化学习人工智能的训练环境,实现了自动化的撕裂模不稳定性预防(如图 9 所示).值得注意的是,它使等离子体能在时变运行空间中主动追踪稳定路径,同时保持高约束性能——这是传统预编程控制难以实现的.

4.2 代理模型与计算加速

为解决物理模型计算耗时过长的问题,AI 代理模型应运而生.在德国 Wendelstein 7-X 装置上,针对边界三维输运模型(EMC3-EIRENE)等复杂模型,研究人员通过构建包含 460 余个案例计算数据的数据库,结合光谱诊断数据与边界温度、密度等测量结果,实现了模拟计算分析效率的跨越式提升(Luo et al. 2025, Luo et al. 2026).原本需数天完成的单个时间片分析,如今可在几秒内完成整炮数据的所有时间片分析,且能准确再现边界能量、粒子/杂质输运和粒子再循环等关键物理特征,既保证了计算精度,又满足了工程迭代和实验炮间分析的快速需求.图 10 以低辐射比例情况下为例,对代理模型准确性进行了评估,可以看到此时代理模型即使针对刮削层(SOL)外侧也能实现令人满意的结果.

4.3 诊断数据处理与重建

AI 技术在核聚变数据处理中发挥着关键作用.针对实验数据缺失问题,研究人员利用机器学习算法,结合加热功率、密度范围、光谱诊断、边界充气特征等多源数据,实现了缺失数据的重建与特征还原.在德国 Wendelstein 7-X 装置的快速移动探针测量中,通过神经网络模型预测的电子温度分布与实验测量数据高度吻合,为实验分析提供了完整的数据支撑.此外,AI 还能高效处理长脉冲实验产生的海量数据,自动弥补数据采集的时间和空间分辨率的不足,并从中提取关键物理信息,为研究人员提供决策支持.

4.4 风险预测与防控

AI 已成为核聚变装置风险防控的核心技术手段.在破裂预测领域,欧盟 JET 研究人员在《Nature Physics》22 年发表了相关研究成果(Vega et al. 2022),中国新奥玄龙-50 球形环 [53]

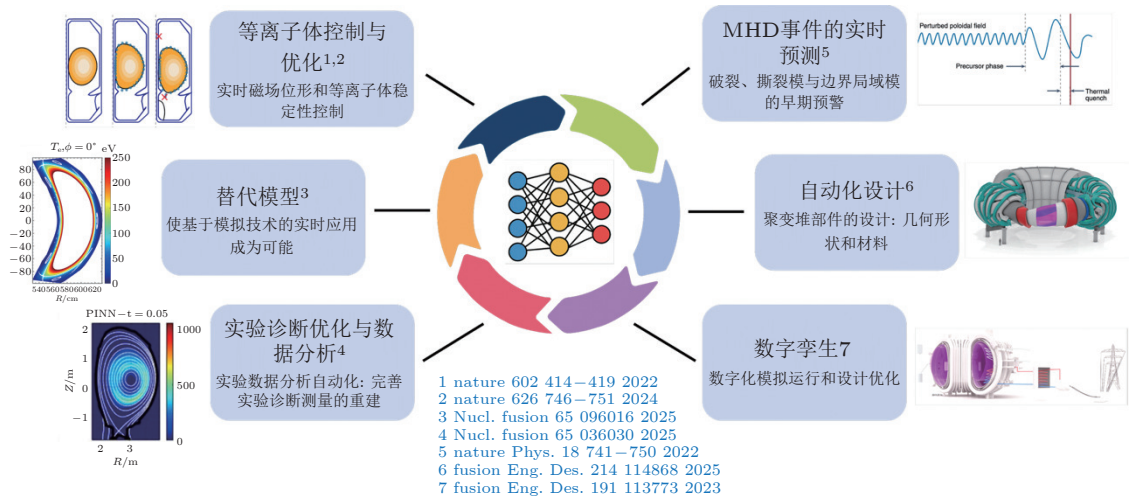


图 7

聚变能源研究中的 AI 技术应用

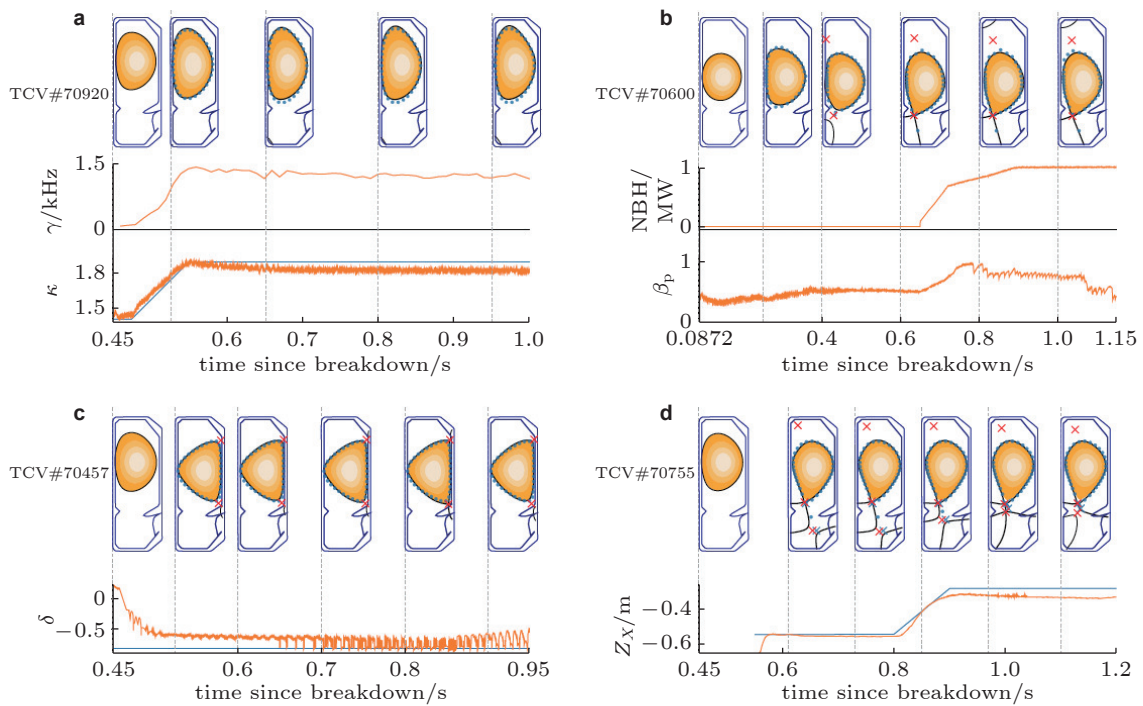


图 8

TCV 托卡马克上多种不同等离子体位形 AI 控制演示, a、大纵向拉长比位形; b、类 ITER 位形. c、负三角度位形. d、雪花偏滤器位形. 图中半径为 2 厘米的蓝色圆圈标注目标位形; 黑色实线为平衡重建等离子体边界. 所有图中, 首帧时间切片显示交接状态 (Degraeve et al. 2022)

装置的破裂预测系统也取得良好效果 (如图 11 所示). AI 技术可提前识别不稳定性前兆, 为主动控制/缓解提供充足时间窗口, 通过调整外部磁场或加热功率等方式, 实现风险的 “软着陆”, 保障装置安全运行.

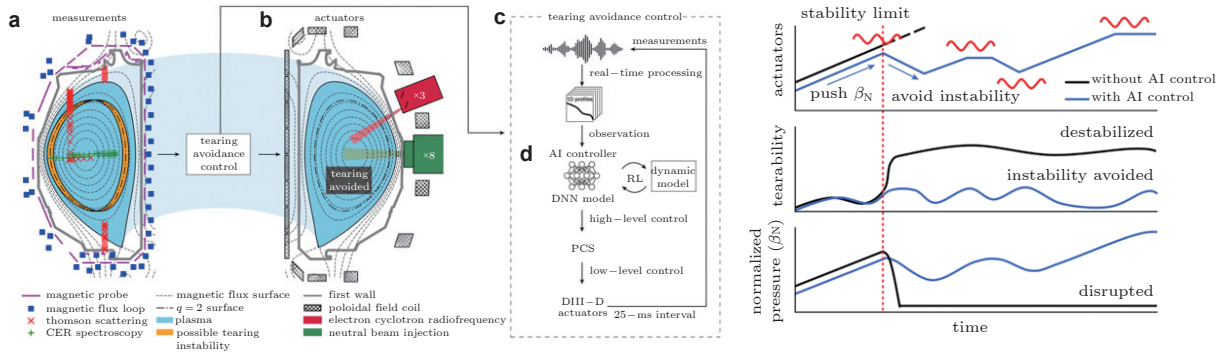


图 9

DIII-D 托卡马克装置 (左) 人工智能撕裂模控制整体架构系统, 及其 (右) 对等离子体控制响应示意图 (Seo et al. 2024)

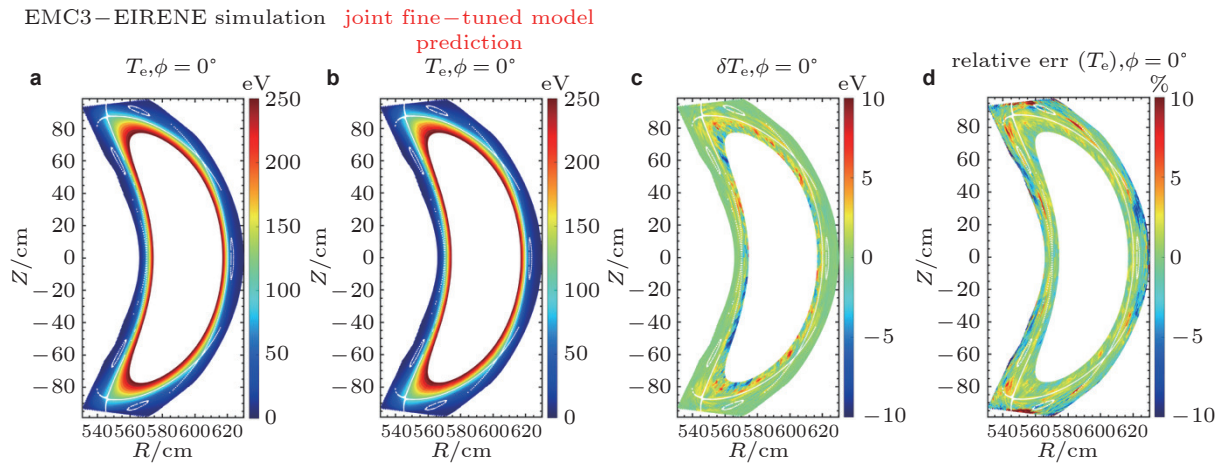


图 10

低辐射比例情况下边界等离子体电子温度预测结果与真实模拟值的对比. (a) EMC3-EIRENE 模拟参考值; (b) 联合微调代理模型的预测结果; (c) 预测值与模拟值之间的偏差; (d) 二者之间的相对误差 (Luo et al. 2026)

4.5 装置设计与优化

AI 技术为核聚变装置设计提供了智能化工具. 以仿星器线圈设计为例, 高场准等动力学 (Quasi-isodynamic, QI) 仿星器 Stellaris 的概念设计如图 12 所示, 其模块化线圈三维形状及等离子体表面磁场强度分布直观体现了该类设计的三维复杂性与高场约束需求 (Lion et al. 2025). 而 AI 可以兼顾物理规律和超导材料工程特性, 快速优化线圈三维形状, 实现磁场分布的精准调控, 降低新经典输运, 提升高能粒子约束能力, 为聚变反应产生的阿尔法粒子慢化与背景等离子体加热创造有利条件. 在材料领域, AI 已应用于第一性原理材料研究, 为聚变装置第一壁材料等关键部件的设计与优化提供了全新路径 (Tindall et al. 2023).

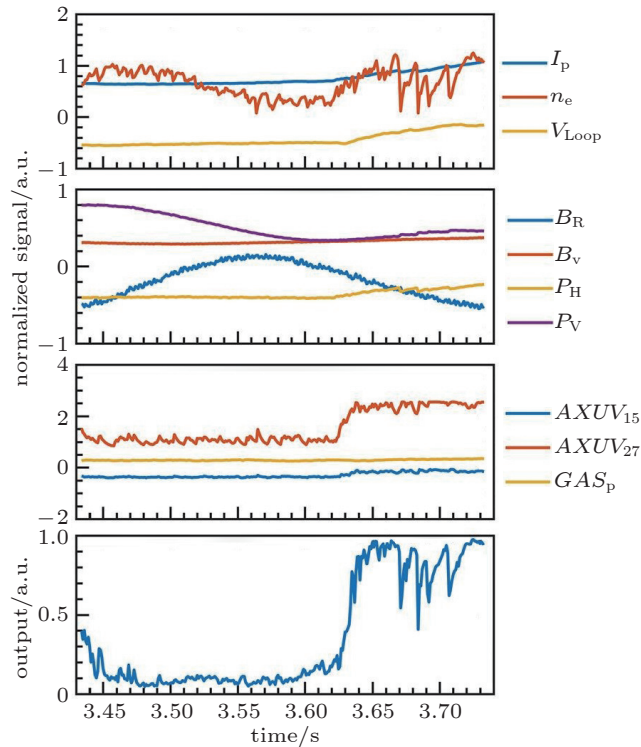


图 11

EXL-50 装置等离子体破裂预测示例 (Cai et al. 2024)

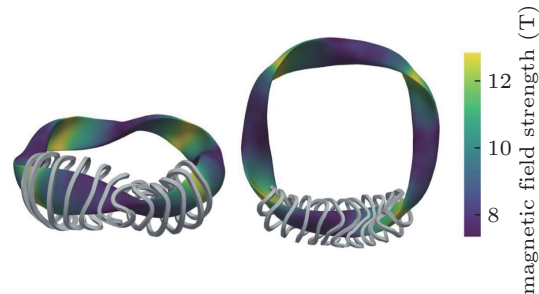


图 12

用于 Stellaris 的 QI 仿星器装置可视化示意图. 图中展示了 VMEC 自由边界平衡等离子体计算边界及其对应的磁场强度分布. 图中展示了一个旋转对称模块 (即一个完整磁场周期) 的结构, 及其对应的线圈组 (Lion et al. 2025)

4.6 数字孪生 (Digital Twins)

AI 技术为数字孪生提供了核心驱动力, 推动核聚变研究从碎片化模拟迈向集成化的端到端管理. 通过 AI 驱动的代理模型, 研究人员构建了统一的“数字线程” (Digital Thread), 将反应堆从设计、运行到退役的全生命周期数据深度融合. 在英国 STEP 及韩国 V-KSTAR 的项目中, AI 助力偏滤器、磁体等关键组件实现了高精度的模块化数字分身, 通过极速的计算机仿真 (in silico) 测试大幅缩短了研发周期, 显著降低了物理实验成本 (Battye et al. 2025). 图 13 给出了数

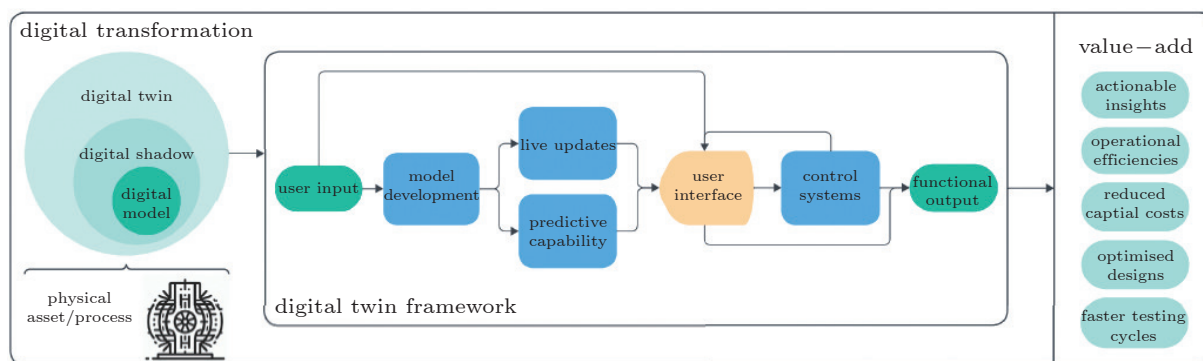


图 13

数字化转型背景下数字孪生框架的示例 (Battye et al. 2025)

数字孪生框架的示例: 系统以物理资产 (过程数据) 与用户输入为起点, 通过模型开发以及实时更新与预测模块持续校准, 并经由用户界面与控制系统输出功能结果, 形成从数据到决策的闭环。由此可见, 依靠 AI 对实时数据的持续学习, 系统能够实现动态校准与预测性维护, 为核聚变从实验探索向商业化电站的跨越开辟了高效的智能化路径。

5 全球布局与未来展望

在聚变领域里, AI 应用的难点不在于“模型能不能拟合”, 而在于能否在数据稀缺且昂贵、分布随装置与工况不断变换的条件下保持可靠。等离子体自组织化的高度非线性、强耦合且多尺度, 使得模型外推到新工况/跨装置时容易出现“自信但错误”。与此同时, AI 若要进入实时运行与控制回路, 必须满足低延迟与可信度高的工程要求。因此, 聚变 AI 的发展将是一条“以应用牵引、以验证护航”的迭代路径: 在不断吸收新数据、融合物理约束并满足安全与实时工程要求的过程中, 逐步释放其对聚变研发与运行的变革价值。

5.1 全球行业布局

欧洲在 AI + 聚变领域的布局最为迅速, 2024 年已成立专业部门, 启动 15 个重点项目, 聚焦控制优化、概率模型构建与诊断数据分析等核心方向 (Vries 2024)。中国、美国、日本、德国等国家均在积极推进相关研究, 形成了全球竞争与合作并存的发展格局。中国凭借东方超环等先进装置与完善的产业链优势, 在磁约束聚变与 AI 融合应用方面处于世界前列 (Chen et al. 2026, Feng et al. 2026, Guo et al. 2023, Hu et al. 2021, Lin et al. 2024, Lin et al. 2025, Wan et al. 2022, Wan et al. 2023, Wang et al. 2025, Yang et al. 2022, Yang et al. 2025, Zhang et al. 2024, Zheng et al. 2024, Zheng et al. 2018), 私人聚变产业与科研机构协同发展, 推动技术快速迭代。

5.2 未来发展方向

AI 与核聚变的深度融合将成为未来研究的核心方向之一。数据重建与 AI 实现、代理模型优化、风险精准预测、装置智能化设计和数字孪生平台等领域将持续取得突破, 推动核聚变技

术向更高参数、更稳定、更高效的方向发展. 未来需重点攻克数据质量提升、模型迁移与验证、AI 解决方案可靠性等关键问题, 建立覆盖设计、运行、维护全流程的智能化体系.

5.3 对全球能源格局的影响

核聚变与 AI 的融合发展将引发全球能源格局的根本性变革. 聚变能源的商业化应用将彻底改变现有能源结构, 摆脱对化石能源的依赖, 为全球实现 “双碳” 目标提供核心支撑. 中国若能持续保持在该领域的技术优势, 将在全球能源革命中占据主导地位, 通过能源自主保障国家能源安全, 同时为全球能源治理贡献中国方案. AI + 聚变技术的突破还将带动相关产业链的发展, 催生新的科技革命与产业变革, 创造巨大的经济与社会价值.

6 结 论

AI 技术在复杂系统优化、智能控制和数据分析等方面具有独特优势, 与核聚变所蕴含的长期能源潜力形成了完美契合, 二者的深度融合为解决全球能源危机提供了潜在解决方案. 当前核聚变研究已取得一系列关键突破, 商业化进程加速推进, 产业链日趋完善, 而 AI 技术在控制优化、数据处理、模型加速、风险防控等领域的应用, 正破解核聚变研究的核心难题, 推动技术迭代与工程化落地. 尽管仍面临数据质量、模型可靠性、安全防控等多重挑战, 但随着全球各国的持续投入与协同创新, AI + 聚变必将在 21 世纪 30 年代实现商业化突破, 引发全球能源格局的深刻变革, 为人类社会的可持续发展提供坚实保障. 未来, 需进一步加强跨学科合作, 完善科研与产业生态, 加速技术转化与验证, 让聚变能源早日走进现实, 照亮人类未来.

参 考 文 献

- Abdou M, Morley N B, Smolentsev S, et al. 2015. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO. *Fusion Engineering and Design*, **100**: 2-43.
- Abdou M, Riva M, Ying A, et al. 2021. Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. *Nuclear Fusion*, **61**(1): 013001.
- Anand H, Bardsley O, Humphreys D, et al. 2023. Modelling, design and simulation of plasma magnetic control for the Spherical Tokamak for Energy Production (STEP). *Fusion Engineering and Design*, **194**: 113724.
- Andreeva T, Beidler C D, Harmeyer E, et al. 2004. The Helias Reactor Concept: Comparative Analysis of Different Field Period Configurations. *Fusion Science and Technology*, **46**(2): 395-400.
- Battye M I, Perinpanayagam S. 2025. Digital Twins in Fusion Energy Research: Current State and Future Directions. *IEEE Access*, **13**: 75787-75821.
- Bucalossi J, Achard J, Agullo O, et al. 2022. Operating a full tungsten actively cooled tokamak: overview of WEST first phase of operation. *Nuclear Fusion*, **62**(4): 042007.
- Cai J, Liang Y, Knieps A, et al. 2024. Improved training framework in a neural network model for disruption prediction and its application on EXL-50. *Plasma Science and Technology*, **26**(5): 055102.
- CEA. 2025. Nuclear fusion: WEST beats the world record for plasma duration. <https://www.cea.fr/english/Pages/News/nuclear-fusion-west-beats-the-world-record-for-plasma-duration.aspx>. Accessed.
- Chen M W, Yang K J, Zhu J J, et al. 2026. Vi-DP: low-latency video-based disruption prediction with multi-FOV fusion in EAST. *Nuclear Fusion*, **66**(1): 016002.

- Cheng J, Xu Y, Liu H F, et al. 2025. Construction progress of the Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator (CFQS) and preliminary experimental results on the CFQS-Test device. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **67**(10): 105011.
- De Vries P C, Johnson M F, Segui I, et al. 2009. Statistical analysis of disruptions in JET. *Nuclear Fusion*, **49**(5): 055011.
- Degrave J, Felici F, Buchli J, et al. 2022. Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning. *Nature*, **602**(7897): 414-419.
- Ding R, Chan V S, Li J. 2025. Integrated physics design of conventional H-mode scenario for China Fusion Engineering Demo Reactor. *Plasma Science and Technology*, **27**(10): 100101.
- Esteva A, Kuprel B, Novoa R A, et al. 2017. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, **542**(7639): 115-118.
- Feng Y, Wan C, Huang J, et al. 2026. Fast end-to-end plasma density profile reconstruction from microwave reflectometer data on EAST. *Nuclear Fusion*, **66**(1): 014004.
- Fenstermacher M E, Abbate J, Abe S, et al. 2022. DIII-D research advancing the physics basis for optimizing the tokamak approach to fusion energy. *Nuclear Fusion*, **62**(4): 042024.
- Fleschner F. 2025. Wendelstein 7-X sets new performance records in fusion research. <https://www.ipp.mpg.de/5532945/w7x>. Accessed.
- Fleschner F. 2025. Wendelstein 7-X sets new performance records in fusion research [UPDATE]. <https://www.ipp.mpg.de/5532945/w7x>. Accessed.
- Fujita T, Kamada Y, Ishida S, et al. 1999. High performance experiments in JT-60U reversed shear discharges. *Nuclear Fusion*, **39**(11Y): 1627.
- Goldman L M, Spitzer L J. 1953. Preliminary Experimental Results With the Model A Stellarator. Accessed.
- Guo B H, Chen D L, Rea C, et al. 2023. Disruption prediction on EAST with different wall conditions based on a multi-scale deep hybrid neural network. *Nuclear Fusion*, **63**(9): 094001.
- Hu W H, Rea C, Yuan Q P, et al. 2021. Real-time prediction of high-density EAST disruptions using random forest. *Nuclear Fusion*, **61**(6): 066034.
- IEA. 2025. Energy and AI. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>. Accessed.
- Igochine V. 2015. Edge Localized Mode (ELM). In: Igochine, V. (eds) Active Control of Magneto-hydrodynamic Instabilities in Hot Plasmas. Springer Series on Atomic. Springer.
- Itoh S, Sato K N, Nakamura K, et al. 1999. Recent progress in the superconducting tokamak TRIAM-1M. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **41**(3A): A587.
- Kappatou A, Baruzzo M, Hakola A, et al. 2025. Overview of the third JET deuterium-tritium campaign. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **67**(4): 045039.
- Klinger T, Andreeva T, Bozhnikov S, et al. 2019. Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation. *Nuclear Fusion*, **59**(11): 112004.
- Ko W, Yoon S W, Kim W C, et al. 2024. Overview of the KSTAR experiments toward fusion reactor. *Nuclear Fusion*, **64**(11): 112010.
- Komori A, Yamada H, Kaneko O, et al. 2000. Overview of the Large Helical Device. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **42**(11): 1165.
- Li J, Guo H Y, Wan B N, et al. 2013. A long-pulse high-confinement plasma regime in the Experimental Advanced Superconducting Tokamak. *Nature Physics*, **9**(12): 817-821.
- Li J, Wan B N, Luo J R, et al. 2003. Long pulse enhanced confinement discharges in the HT-7 superconducting tokamak by ion Bernstein wave heating and lower hybrid wave current drive. *Physics of*

- Plasmas*, **10**(5): 1653-1658.
- Liang Y, Koslowski H R, Krämer-Flecken A, et al. 2007. Observations of secondary structures after collapse events occurring at the $q = 2$ magnetic surface in the TEXTOR tokamak. *Nuclear Fusion*, **47**(9): L21.
- Liang Y, Koslowski H R, Thomas P R, et al. 2007. Active Control of Type-I Edge-Localized Modes with $n=1$ Perturbation Fields in the JET Tokamak. *Physical Review Letters*, **98**(26): 265004.
- Lin Z, Zhang H, Wang F, et al. 2024. Prediction of plasma rotation velocity and ion temperature profiles in EAST Tokamak using artificial neural network models. *Nuclear Fusion*, **64**(10): 106061.
- Lin Z, Zhang H, Wang F, et al. 2025. Development of a neural network-based model for electron temperature inference via modelled and experimental argon spectra measured by x-ray crystal spectrometer with an extension to tungsten spectra on EAST. *Nuclear Fusion*, **65**(11): 116035.
- Linke J, Du J, Loewenhoff T, et al. 2019. Challenges for plasma-facing components in nuclear fusion. *Matter and Radiation at Extremes*, **4**(5): 056201.
- Lion J, Anglès J C, Bonauer L, et al. 2025. Stellaris: A high-field quasi-isodynamic stellarator for a prototypical fusion power plant. *Fusion Engineering and Design*, **214**: 114868.
- Liu M, Xie H, Wang Y, et al. 2024. ENN's roadmap for proton-boron fusion based on spherical torus. *Physics of Plasmas*, **31**(6): 062507.
- Luo Y, Xu S, Liang Y, et al. 2025. A neural network-based method for input parameter optimization of edge transport modeling utilizing experimental diagnostics. *Nuclear Fusion*, **65**(9): 096016.
- Luo Y, Xu S, Liang Y, et al. 2026. Neural network-based surrogate model for 3D edge-plasma transport in the standard configuration of W7-X. *Nuclear Fusion*, **66**(1): 016038.
- Meade D. 1988. Results and plans for the Tokamak Fusion Test Reactor. *Journal of Fusion Energy*, **7**(2): 107-114.
- Pamela J. 1999. Ten years of operation and developments on Tore Supra. *Fusion Engineering and Design*, **46**(2): 313-322.
- Peacock N J, Robinson D C, Forrest M J, et al. 1969. Measurement of the Electron Temperature by Thomson Scattering in Tokamak T3. *Nature*, **224**(5218): 488-490.
- Seo J, Kim S, Jalalvand A, et al. 2024. Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning. *Nature*, **626**(8000): 746-751.
- Shi Y, Song X, Guo D, et al. 2025. Strategy and experimental progress of the EXL-50U spherical torus in support of the EHL-2 project. *Plasma Science and Technology*, **27**(2): 024003.
- Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. 2016. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, **529**(7587): 484-489.
- Song Y, Zou X, Gong X, et al. Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in Tokamak EAST. *Sci Adv*, **9**(1): eabq5273.
- Sorbom B N, Ball J, Palmer T R, et al. 2015. ARC: A compact, high-field, fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets. *Fusion Engineering and Design*, **100**: 378-405.
- Spitzer L. 1981. The Stellarator Concept. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **9**(4): 130-141.
- Tan Y, Wang B, Wang S, et al. NTST, A Negative Triangularity Spherical Tokamak. In: Proceedings of IAEA Fusion Energy. Conference, Conference 2025a.
- Tan Y, Wang B, Wang S, et al. Recent progress on the SUNIST-2 spherical tokamak. In: Proceedings of IAEA Fusion Energy. Conference, Conference 2025b.
- Tindall M, Rosini S, Bowden N, et al. 2023. Towards a fusion component digital twin – virtual test and monitoring of components in CHIMERA by systems simulation. *Fusion Engineering and Design*, **191**:

113773.

- Tomarchio V, Barabaschi P, Di Pietro E, et al. 2017. Status of the JT-60SA project: An overview on fabrication, assembly and future exploitation. *Fusion Engineering and Design*, **123**: 3-10.
- Townshend R J L, Eismann S, Watkins A M, et al. 2021. Geometric deep learning of RNA structure. *Science*, **373**(6558): 1047-1051.
- Vega J, Murari A, Dormido-Canto S, et al. 2022. Disruption prediction with artificial intelligence techniques in tokamak plasmas. *Nature Physics*, **18**(7): 741-750.
- Vries G. 2024. EUROfusion spearheads advances in Artificial Intelligence and Machine Learning to unlock fusion energy. <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/eurofusion-spearheads-advances-in-artificial-intelligence-and-machine-learning-to-unlock-fusion-energy/>. Accessed.
- Waltz R E, Kerbel G D, Milovich J. 1994. Toroidal gyro - Landau fluid model turbulence simulations in a nonlinear ballooning mode representation with radial modes. *Physics of Plasmas*, **1**(7): 2229-2244.
- Wan C, Yu Z, Pau A, et al. 2022. EAST discharge prediction without integrating simulation results. *Nuclear Fusion*, **62**(12): 126060.
- Wan C, Yu Z, Pau A, et al. 2023. A machine-learning-based tool for last closed-flux surface reconstruction on tokamaks. *Nuclear Fusion*, **63**(5): 056019.
- Wang T, He X, Li M, et al. 2024. Ab initio characterization of protein molecular dynamics with AI2BMD. *Nature*, **635**(8040): 1019-1027.
- Wang Z, Schuster E, Rafiq T, et al. 2025. Enabling model-based scenario control in EAST by fast surrogate modeling within COTSIM. *Fusion Engineering and Design*, **215**: 114969.
- Xiao C, Liu M, Yao K, et al. 2025. Ultrabroadband and band-selective thermal meta-emitters by machine learning. *Nature*, **643**(8070): 80-88.
- Yang Z, Xia F, Song X, et al. 2022. Real-time disruption prediction in the plasma control system of HL-2A based on deep learning. *Fusion Engineering and Design*, **182**: 113223.
- Yang Z, Zhong W, Xia F, et al. 2025. Implementing deep learning-based disruption prediction in a drifting data environment of new tokamak: HL-3. *Nuclear Fusion*, **65**(2): 026030.
- Zhang Y C, Wang S, Yuan Q P, et al. 2024. Real-time feedback control of β_p based on deep reinforcement learning on EAST. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **66**(5): 055014.
- Zheng G H, Yang Z Y, Liu S F, et al. 2024. Real-time equilibrium reconstruction by multi-task learning neural network based on HL-3 tokamak. *Nuclear Fusion*, **64**(12): 126041.
- Zheng J, Qin J, Lu K, et al. 2022. Recent progress in Chinese fusion research based on superconducting tokamak configuration. *The Innovation*, **3**(4): 100269.
- Zheng W, Hu F R, Zhang M, et al. 2018. Hybrid neural network for density limit disruption prediction and avoidance on J-TEXT tokamak. *Nuclear Fusion*, **58**(5): 056016.
- Zhong W. 2024. China's HL-3 tokamak achieves H-mode operation with 1 MA plasma current. *The Innovation*, **5**(1): 100555.
- Zhong W, Chen W, Ji X. 2026. Breakthrough in China's fusion energy: HL-3 tokamak achieves high ion temperature and fusion triple product. *The Innovation*, **7**(2).
- Zhou S, Liang Y, Knieps A, et al. 2022. Equilibrium effects on the structure of island divertor and its impact on the divertor heat flux distribution in Wendelstein 7-X. *Nuclear Fusion*, **62**(10): 106002.

AI + Nuclear Fusion: A Crucial Opportunity for the Transformation of the Global Energy Pattern

LIANG Yunfeng^{*}

Institute of Plasma Physics, Institute of Fusion Energy and Nuclear Waste Management,
Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany

Abstract The rise of artificial intelligence (AI), particularly its transformative advance in algorithm and large-scale data processing, has provided a new path for humanity to address the energy crisis. As the ultimate form of future energy, nuclear fusion has advanced from basic research to the commercialization threshold after more than 70 years of development. This paper systematically elaborates on the current development status and key challenges of global nuclear fusion research, deeply analyzes the application scenarios and practical achievements of AI technology in key fields such as nuclear fusion device control, data processing, model optimization, and risk management, discusses the transformative impact of the integration of AI and nuclear fusion on the global energy pattern, and finally looks forward to the future development direction and industrial layout of this field, providing a reference for promoting the energy revolution and scientific and technological progress.

Keywords Artificial Intelligence, Nuclear Fusion, Energy Pattern, Tokamak, Stellarator, Intelligent Control, Surrogate Model

Received: 31 December 2025; accepted: 7 April 2026; online:

* E-mail: y.liang@ipp.ac.cn

© 2026 *Advances in Mechanics*.



梁云峰, 德国于利希研究中心聚变能与核废料管理研究院等离子体物理研究所 (IFN-1) 主任研究员, 杜塞尔多夫大学教授、北京大学客座教授, IOP 期刊《Plasma Science and Technology》主编. 30 余年深耕磁约束聚变等离子体物理, 在 JT-60SA、JET、W7-X、EAST 等 16 台装置上开展实验研究. 曾获亥姆霍兹学会青年科学家基金, 入选中国国家特聘教授. 截至 2025 年底, 发表 SCI 论文 500 余篇, 总引用逾 15 000 次, 第一作者单篇最高引用 730 多次, 其中 16 篇发表于 Physical Review Letters, H 指数为 67.