

国防军工行业深度报告

可控核聚变系列深度②：新一代托卡马克的建成，是实现聚变点火的重要节点

增持（维持）

2025年02月24日

证券分析师 苏立赞

执业证书：S0600521110001

sulz@dwzq.com.cn

证券分析师 许牧

执业证书：S0600523060002

xumu@dwzq.com.cn

研究助理 高正泰

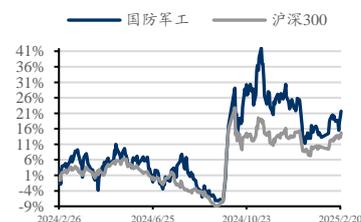
执业证书：S0600123060018

gaozht@dwzq.com.cn

投资要点

- **追溯人类研究核聚变的历史，为何可控核聚变至今尚未实现？**可控核聚变至今尚未实现，主要是由于技术难度、研究进展的曲折性以及聚变点火的复杂性等多方面因素的共同作用。早期，人类在二战后开启了核聚变技术的探索，尝试了多种技术路径，托卡马克技术在20世纪60年代脱颖而出并成为主流研究方向，但在后续发展中，尤其是20世纪80年代，科学家们发现等离子体中存在非线性微观不稳定性引发的湍流，导致反常输运现象，严重破坏了托卡马克对等离子体的约束效果，使得聚变点火的目标难以达成。
- **ITER的诞生背景及其建设进程始终低于预期的原因？**ITER的诞生源于20世纪80年代核聚变研究的挫折，聚变点火的希望被寄托于下一代装置——ITER。但由于其建造成本高昂，美苏等超级大国难以独自承担，因此1985年在日内瓦峰会上倡议由多国共同启动该项目。然而，ITER的建设进程始终低于预期，主要原因是其规模过大导致技术难题频发；法国核安全局对辐射防护措施提出更高要求，暂停了组装工作；供应链问题、监管僵局以及多国合作的协调难度也严重影响了项目进度。ITER项目涉及35个国家，各国在技术标准、资金投入和管理流程上存在差异，决策过程缓慢，科研团队在技术细节和设计理念上存在分歧，进一步增加了协调成本。这些因素共同导致了ITER项目自启动以来多次延期、成本超支，建设进度远未达到预期。
- **商业聚变公司的定位是什么，其中具有代表性的企业有哪些？**商业聚变公司的定位主要集中在通过技术创新和工程化落地推动核聚变技术的商业化应用，目标是实现聚变发电的经济性和可行性。这些公司致力于开发小型化、低成本的聚变装置，以加速技术迭代和降低研发风险。代表性企业包括美国的Commonwealth Fusion Systems（CFS）公司，其通过高温超导磁体技术，显著缩小了托卡马克装置的尺寸，降低了建设成本和周期。商业公司的发展逻辑普遍遵循“小装置、低成本、快速迭代”的原则，为核聚变技术的商业化提供了灵活的路径，推动行业按计划逐步推进，预计在2030至2040年间实现首次并网发电。
- **中国核聚变研究的主力军是谁，分别对应哪些托卡马克装置？**中国核聚变研究的主力军是中国科学院等离子体物理研究所和核工业西南物理研究院。BEST项目与HL-3项目分别是中科院等离子所与西南物理研究院正在建设或升级改造的托卡马克研究装置。未来重点将在我国磁约束主力装置BEST与HL-3上开展与CFETR物理相关的验证性实验，为CFETR的建设奠定坚实的基础。CFETR的核心目标是实现可控核聚变能的工程验证与商业化应用，旨在弥合纯实验装置与未来聚变示范发电厂之间的技术鸿沟，推动聚变能源从实验室走向实际应用。
- **可控核聚变何时能够实现？**可控核聚变的实现时间难以确定，因为当前人类尚未突破多维技术瓶颈。尽管现有托卡马克装置取得了一定突破，但距离持续能量净增益仍差距甚远。新一代托卡马克装置（如ITER、CFETR、SPARC）的建设旨在系统性验证这些物理参数的协同运行极限，其建设落地是实现聚变点火的重要节点。然而，在未获取全参数运行数据前，基于现有实验结果外推时间表是不谨慎的。从历史实验数据和当前进展来看，ITER与SPARC实现可控核聚变的可能性较高，但仍需时间和持续的技术创新。
- **风险提示：**1) 技术成熟度不足；2) 技术更新迭代；3) 市场需求不确定性；4) 商业化进程缓慢。

行业走势



相关研究

《可控核聚变系列深度①：科普，从氦氖反应到托卡马克》

2025-02-05

内容目录

1. 追溯人类研究核聚变的历史，为何可控核聚变至今尚未实现？	4
1.1. 前期摸索阶段：第二次世界大战后至 20 世纪 60 年代	4
1.2. 聚变研究热潮：20 世纪 60 年代至 90 年代	5
1.2.1. 20 世纪 60 年代至 70 年代：托卡马克路线高速发展	5
1.2.2. 20 世纪 80 年代：乐观情绪的顶峰	6
1.2.3. 20 世纪 80 年代至 90 年代：一盆冷水	7
2. ITER 的诞生背景及其建设进程始终低于预期的原因？	8
2.1. ITER 是人类历史上最大的托卡马克	8
2.2. 过大的装置带来了过多的问题，多种因素导致 ITER 建设进度不及预期	10
3. 商业聚变公司的定位是什么，其中具有代表性的企业有哪些？	12
3.1. 为聚变能公司提供的资金正在全球范围内激增	12
3.2. 高温超导磁体技术推动托卡马克装置小型化	13
4. 中国核聚变研究的主力军是谁，分别对应哪些托卡马克装置？	16
4.1. “中科院等离子所”与“西南物理研究院”是我国核聚变研究主力	16
4.1.1. 中科院等离子所	16
4.1.2. 西南物理研究院	16
4.2. 未来中国托卡马克的研究将为 CFETR 的建设奠定基础	17
4.3. 国家项目与商业公司并举，中国商业核聚变公司加速崛起	18
5. 可控核聚变何时能够实现？	20
6. 风险提示	22

图表目录

图 1:	前苏联 T-1 是全球第一台托卡马克	4
图 2:	前苏联 T-3 掀起了全球托卡马克研究的热潮	4
图 3:	聚变三重积 (图中蓝线) 的提升速度一度堪比摩尔定律 (图中红线)	5
图 4:	20 世纪 80 年代的四大托卡马克	6
图 5:	1985 年戈尔巴乔夫在日内瓦峰会上向里根提出开发聚变能源国际合作项目的想法	8
图 6:	21 世纪前托卡马克装置越建越大 (图中更大的圆代表托卡马克更大的体积)	9
图 7:	ITER 建成后将成为人类最大的托卡马克装置 (图中有三个人)	9
图 8:	ITER 的建设进度与建设预算始终不及预期	11
图 9:	2010-2024 年全球对聚变能公司的权益投资	12
图 10:	全球商业聚变公司成立时间线	13
图 11:	预计聚变公司何时将向电网供电?	13
图 12:	第一座核聚变发电厂何时将电力输送到电网?	13
图 13:	CFS 使用一种新型高温超导体 (稀土钡铜氧化物) 制造同类中最强的聚变磁体	14
图 14:	SPARC 是一个小型化的托卡马克装置 (图中有两个人)	15
图 15:	中国托卡马克装置发展主线	17
图 16:	EAST (中国)	17
图 17:	HL-2M (中国)	17
图 18:	CFETR 总体鸟瞰图及装置核心组件解剖图	18
图 19:	中国领先的核聚变商业公司	19
图 20:	历史实验数据预测 ITER 与 SPARC 可以实现聚变点火 (图中右上角)	21
表 1:	托卡马克路线上的高速发展	6
表 2:	SPARC 里程碑	15
表 3:	全球各个核聚变项目在 2040 年之前实验成功的主观概率	20

本文作为可控核聚变系列深度的次篇，尝试探讨一个核心议题：可控核聚变何时能够实现？一个简单回答是：在新一代托卡马克装置建成之前，任何预测都显得为时过早。然而若必须给出一个时间框架，稳健的回答或许在 2035 至 2040 年之间，激进的回答或许在 2030 年左右。

围绕这一终极问题，衍生出一系列子问题，本文将尝试逐一回答：

- 1、追溯人类研究核聚变的历史，为何可控核聚变至今尚未实现？
- 2、全球最大的核聚变实验装置——国际热核聚变实验堆（ITER）的诞生背景及其建设进程始终低于预期的原因？
- 3、商业聚变公司的定位是什么，其中具有代表性的企业有哪些？
- 4、中国核聚变研究的主力军是谁，分别对应哪些重要的托卡马克装置？

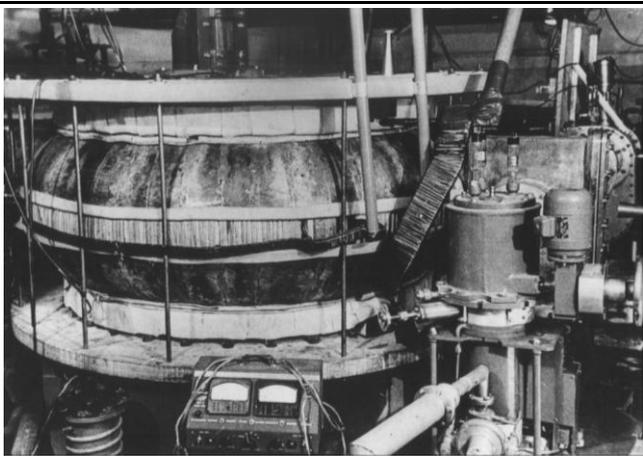
1. 追溯人类研究核聚变的历史，为何可控核聚变至今尚未实现？

1.1. 前期摸索阶段：第二次世界大战后至 20 世纪 60 年代

为了实现可控核聚变，人类在 20 世纪 60 年代尝试了多种技术路径，开启了可控核聚变技术探索的百花齐放时代。这一时期，各国科学家积极探索不同的技术方案，试图找到一种能够有效控制核聚变反应的方法，包括磁镜、箍缩以及仿星器技术等等。

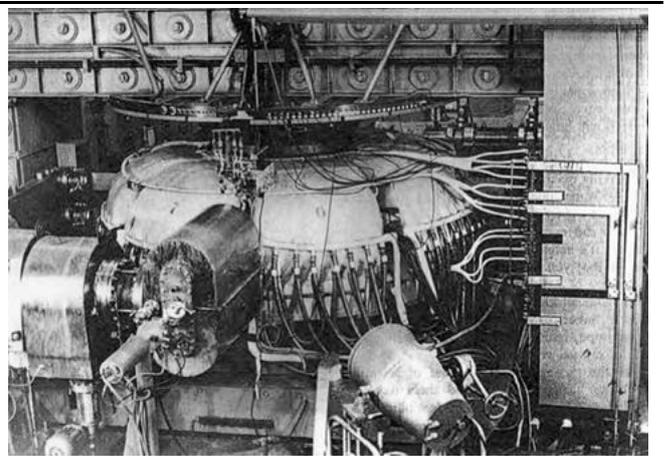
在众多技术路径竞相发展的前夕，托卡马克技术凭借卓越的性能脱颖而出，如今已成为可控核聚变研究领域最主流的技术路线。追溯其发展历程，1958 年，首台托卡马克装置 T-1 正式投入运行，进入 20 世纪 60 年代中期，第三代托卡马克 T-3 的设计迎来重大突破，其性能大幅提升。苏联科学家在 T-3 托卡马克上取得了电子温度 1keV、质子温度 0.5keV，以及 $n\tau=10^{18} \text{ m}^{-3}\cdot\text{s}$ 的显著成果，这一突破在国际上引发了托卡马克技术的热潮。此后，各国纷纷投入资源，建造或改建了一批大型托卡马克装置。

图1：前苏联 T-1 是全球第一台托卡马克



数据来源：ITER，东吴证券研究所

图2：前苏联 T-3 掀起了全球托卡马克研究的热潮

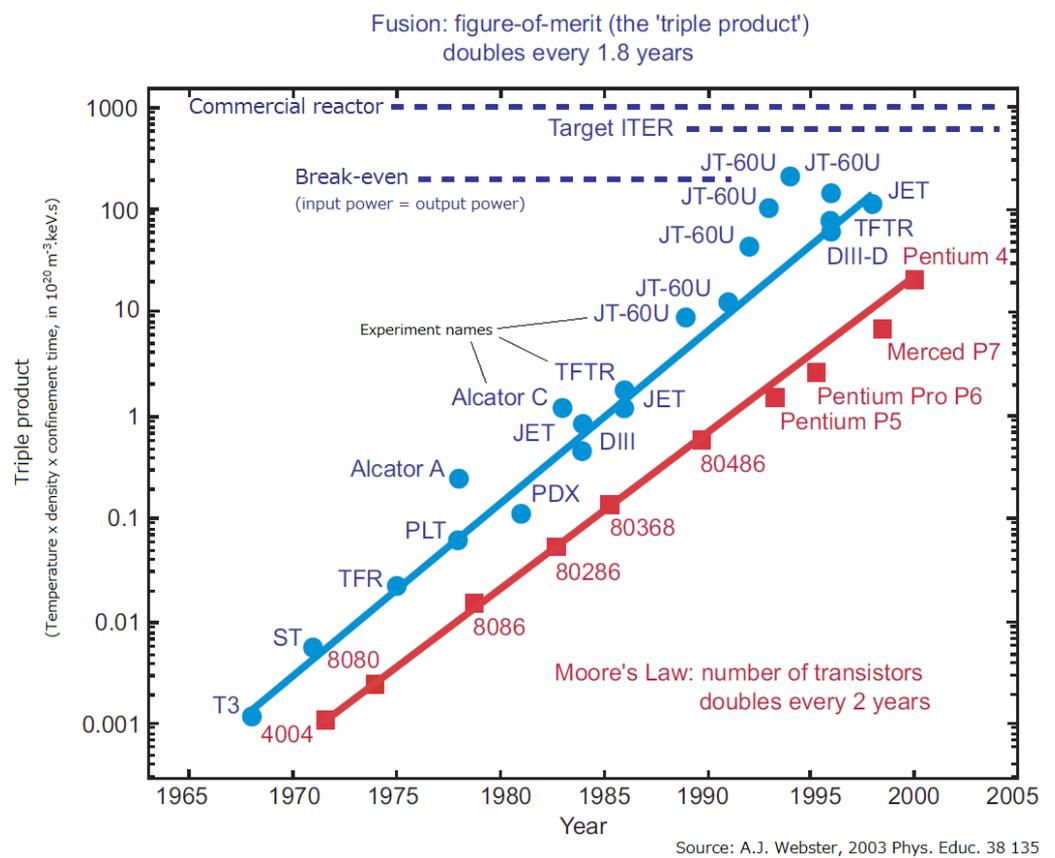


数据来源：Fusion Energy Base，东吴证券研究所

1.2. 聚变研究热潮：20 世纪 60 年代至 90 年代

自 20 世纪 60 年代至 90 年代，可控核聚变研究迎来了黄金发展期。在此期间，衡量聚变装置性能的核心指标——聚变三重积 ($nT\tau_E$ ，即等离子体密度、温度与约束时间的乘积) 呈现出惊人的指数增长态势。全球主要聚变实验装置的三重积指标平均每 1.8 年即实现翻番，这一发展速度超越了同期的摩尔定律。20 世纪 80 年代，美国 TFTR、欧洲 JET、日本 JT-60 等大型托卡马克装置的相继建成，使得三重积指标从 70 年代的约 10^{16} keV·s/m³ 跃升至 90 年代的约 10^{21} keV·s/m³，实现了五个数量级的跨越式提升。

图3：聚变三重积（图中蓝线）的提升速度一度堪比摩尔定律（图中红线）



数据来源：《Fusion: Power for the future》，东吴证券研究所

1.2.1. 20 世纪 60 年代至 70 年代：托卡马克路线高速发展

在 20 世纪 60 年代至 70 年代，托卡马克技术不断取得进展。1968 年，苏联的 T-3 装置成功实现了显著更好的约束效果。随后 1970 年，T-4 装置在实验中首次观察到中子，标志着在磁约束环境下实现聚变的首次成功。1973 年，T-3 装置通过微波辅助加热技术，使电子温度首次上升至一亿度。1978 年，托卡马克技术进展迅速。首先，美国的 PLT 装置通过中性束辅助加热技术，使离子温度首次达到一亿度。这一成果不仅提升了等离子体的加热效率，还为实现更高温度和更长时间的等离子体约束提供了可能。同年，苏联的 T-7 装置作为世界上第一个全超导托卡马克投入运行。全超导技术的应用极大地提高了磁场的稳定性和装置的运行效率，使得长时间稳定运行的聚变反应成为可能。

表1: 托卡马克路线上的高速发展

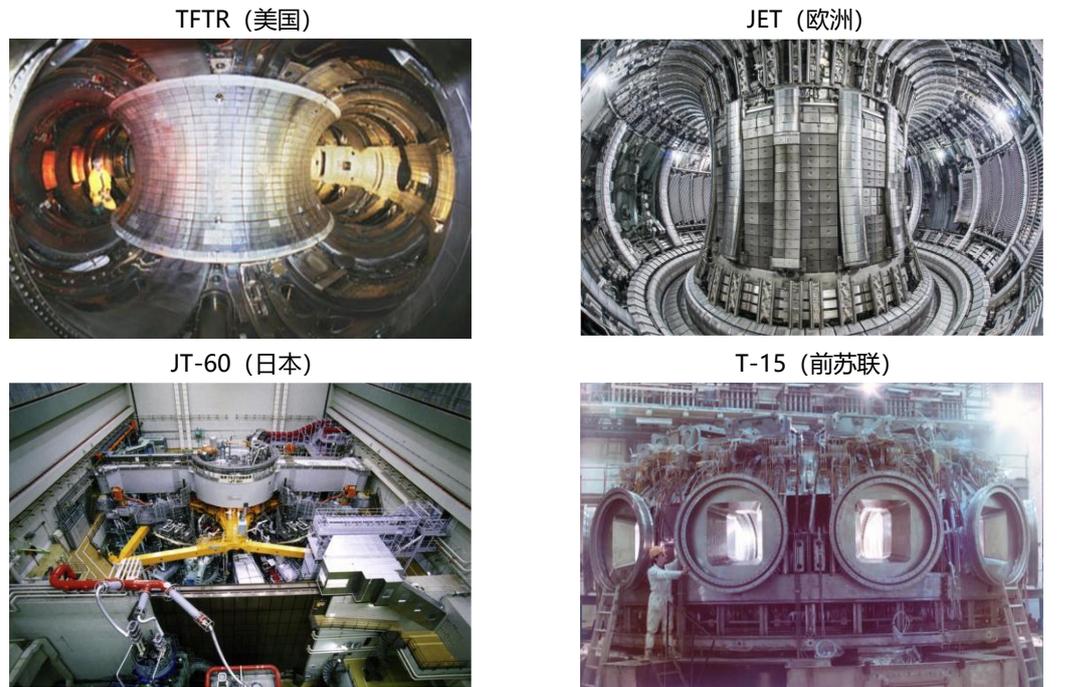
时间	装置	事件
1968	T-3 (苏联)	观察到显著更好的约束效果, 托卡马克装置成为主流
1970	T-4 (苏联)	实验中观察到中子, 标志着首次在磁约束环境下实现聚变
1973	T-3 (苏联)	通过微波辅助加热, 电子温度首次上升至一亿度
1978	PLT (美国)	通过中性束辅助加热, 离子温度首次上升至一亿度
1978	T-7 (苏联)	第一个全超导托卡马克投入运行, 标志着长时间稳定运行的聚变反应成为可能

数据来源: 中国科学院, 东吴证券研究所

1.2.2. 20 世纪 80 年代: 乐观情绪的顶峰

在 20 世纪 70 年代的乐观基调下, 人们开始设计下一代托卡马克装置, 并预期在这一代装置上实现聚变点火。当时出现了四大托卡马克装置, 分别是美国的 TFTR、欧洲的 JET、日本的 JT-60 以及苏联的 T-15。作为这一代装置的代表, TFTR 于 1982 年投入运营, 其设计目标是实现聚变点火, 并为日后建造商用聚变堆做准备。换言之, 按照当时的预期, 如果一切顺利, 未来在 TFTR 的基础上稍作改进就能建成聚变电站。与此同时, JET 装置于 1983 年正式投入运行, 其基本目的是获得和研究接近聚变堆状态和尺寸的等离子体, 从而为未来详细评估托卡马克反应堆的参数、尺寸和工作状况。JT-60 于 1985 年投入运行, 其主要目标是研究高温、高密度等离子体的约束特性以及相关的聚变工程问题。苏联的 T-15 装置于 1987 年投入运行, 其设计目标是研究大尺寸等离子体的约束和加热技术。

图4: 20 世纪 80 年代的四大大托卡马克



数据来源: ITER, 东吴证券研究所

1.2.3. 20 世纪 80 年代至 90 年代：一盆冷水

20 世纪 80 年代，在四大托卡马克装置上陆续发现了新的等离子体运行模式，在新的运行模式下，托卡马克装置的约束效果远不及预期，无法实现聚变点火。在 20 世纪 80 年代建成的托卡马克装置中陆续观测到了等离子体中非线性微观不稳定性引发的湍流，导致了反常输运现象，严重破坏了等离子体的约束，成为可控核聚变研究道路上的重要障碍。后续科学家仍致力于挖掘 80 年代托卡马克装置的潜力，最终在一些装置上实现了 Q 值接近 1 的输出。进入 20 世纪 90 年代，新一代托卡马克装置的建设进度未能如预期般顺利推进，这使得聚变研究的热度在一定程度上有所降温。

2. ITER 的诞生背景及其建设进程始终低于预期的原因？

在经历 20 世纪 80 年代核聚变研究的挫折后，聚变点火的希望被寄托于下一代装置——国际热核聚变实验堆（ITER）。然而，建造更大规模的装置需要巨额资金，即使是美苏这样的超级大国也难以独自承担。因此，1985 年，美国总统里根和苏联领导人戈尔巴乔夫在日内瓦峰会上倡议，由美国、苏联、欧共体（现欧盟）和日本共同启动国际热核聚变实验堆（ITER）。该计划旨在通过国际合作的方式，建造一个可实现大规模聚变反应的实验堆，以验证人类和平利用核聚变能的科学和技术可行性。

图5：1985 年戈尔巴乔夫在日内瓦峰会上向里根提出开发聚变能源国际合作项目的想法



数据来源：ITER，东吴证券研究所

2.1. ITER 是人类历史上最大的托卡马克

本系列深度的第一篇报告《可控核聚变系列深度①：科普，从氘氚反应到托卡马克》介绍了托卡马克定标率的概念，简而言之，托卡马克的约束性能很大程度上取决于装置的尺寸 R 和磁场强度 B 。

$$\tau_E \propto RB$$

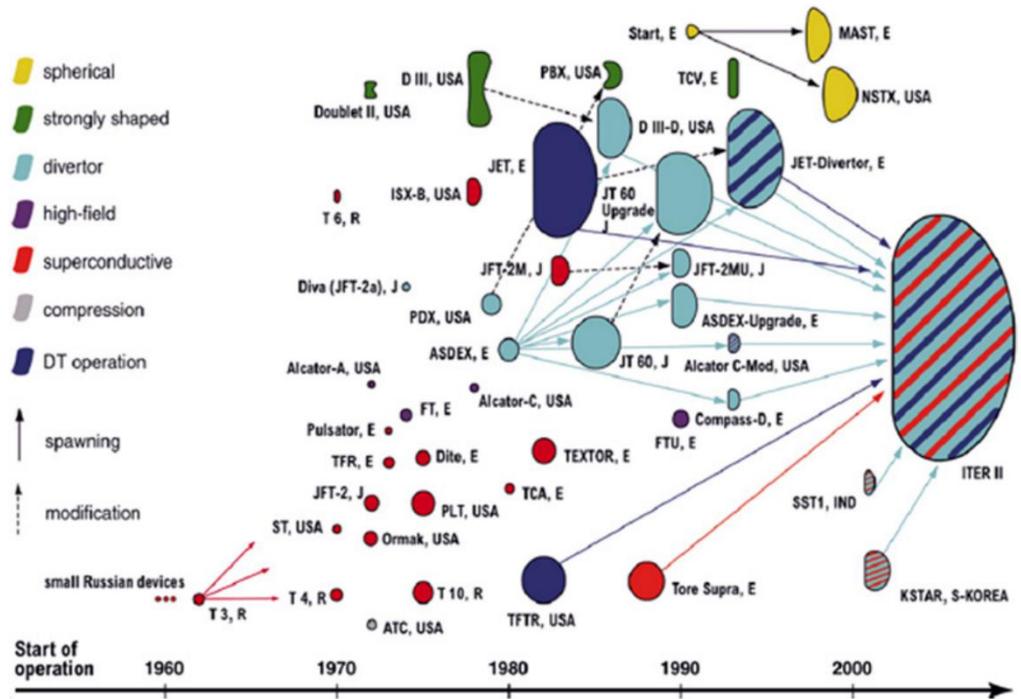
τ_E 能量约束时间

R 等离子体环大半径

B 磁场强度

更大的托卡马克装置能显著提升等离子体约束能力，因此在 21 世纪前，出现了托卡马克越建越大的趋势。20 世纪 70 年代至 2000 年前后，全球范围内建设了多个大型托卡马克装置，如美国的 TFTR、欧盟的 JET、日本的 JT-60U 等。这些装置通过增加尺寸和提升磁场强度，显著提高了等离子体的约束能力和聚变性能。

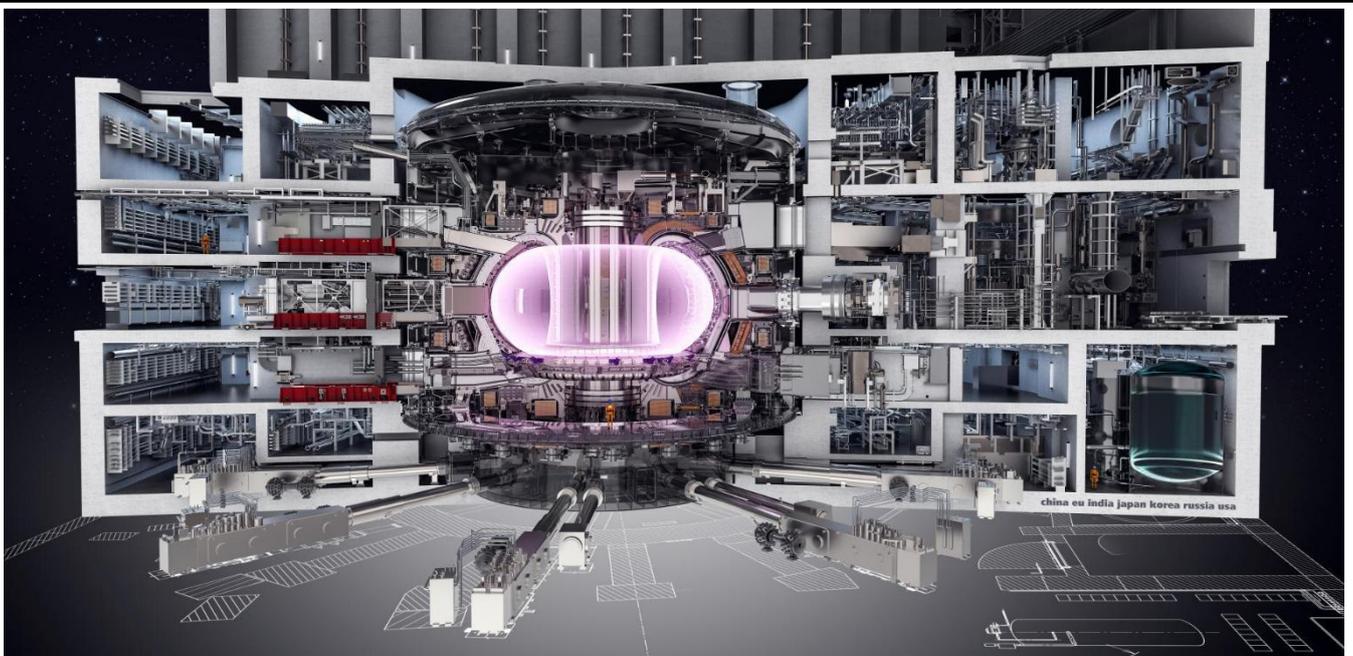
图6：21 世纪前托卡马克装置越建越大（图中更大的圆代表托卡马克更大的体积）



数据来源：《ITER on the road to fusion energy》，东吴证券研究所

ITER 的建造体现了“增加托卡马克尺寸”这一逻辑，建成后将成为人类最大的托卡马克装置。ITER 的整体重量达 2.3 万吨，高度接近 30 米，规模显著超过目前运行的最大实验聚变反应堆。

图7：ITER 建成后将成为人类最大的托卡马克装置（图中有三个人）



数据来源：ITER，东吴证券研究所

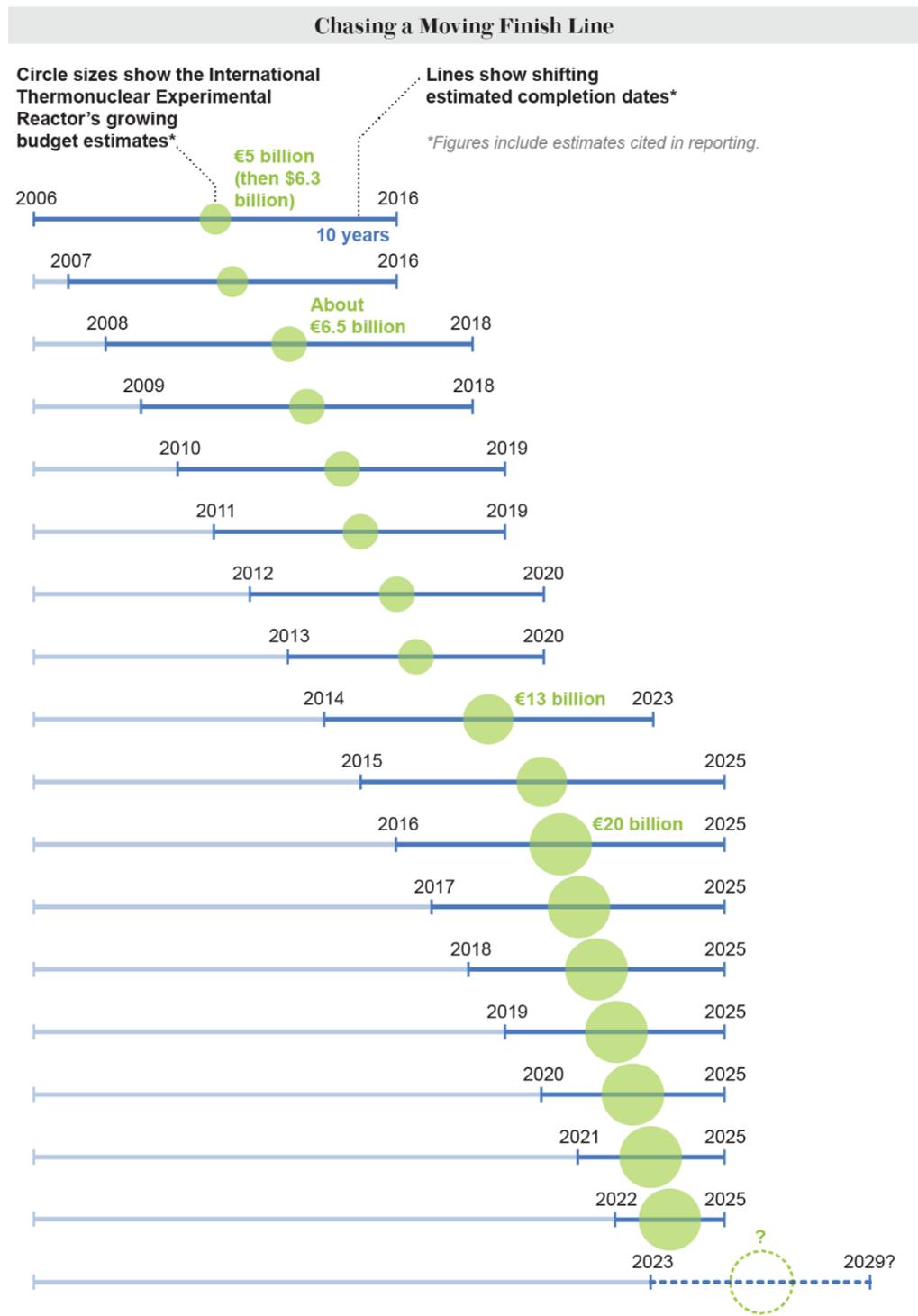
2.2. 过大的装置带来了过多的问题，多种因素导致 ITER 建设进度不及预期

ITER 项目自启动以来，一直面临严重的延期和超支问题，进展远未达到预期。该项目最初计划于 2016 年投入运行，但多次推迟，目前预计或许要到 2026 年才能启动。自 2006 年项目开始以来，成本已从最初的 50 亿欧元飙升至超过 200 亿欧元。这一巨额投资不仅包括建设费用，还包括未来数年的运营成本。

ITER 的延期和超支问题主要源于多方面的问题。首先，技术难题频发，例如磁体线圈和真空室部分存在严重缺陷，需要进行昂贵的修复工作。其次，法国核安全局暂停了 ITER 的组装工作，要求提供更充分的辐射防护措施。此外，供应链问题和监管僵局也导致项目进展缓慢。例如，部分部件落后于进度，系统出现缺陷，如隔热层和真空容器精度不足。

多国合作的协调问题也使得项目在执行过程中难以持续推进。ITER 项目涉及 35 个国家的合作，这种多国参与的模式虽然汇聚了全球资源，但也带来了协调难度。各国在技术标准、资金投入和管理流程上存在差异，导致决策过程缓慢。例如，项目内部管理层的更替也对进度产生了负面影响。此外，不同国家的科研团队在技术细节和设计理念上可能存在分歧，进一步增加了协调成本。这种复杂的国际合作关系使得项目在执行过程中难以高效推进，导致进度一再延误。

图8: ITER 的建设进度与建设预算始终不及预期



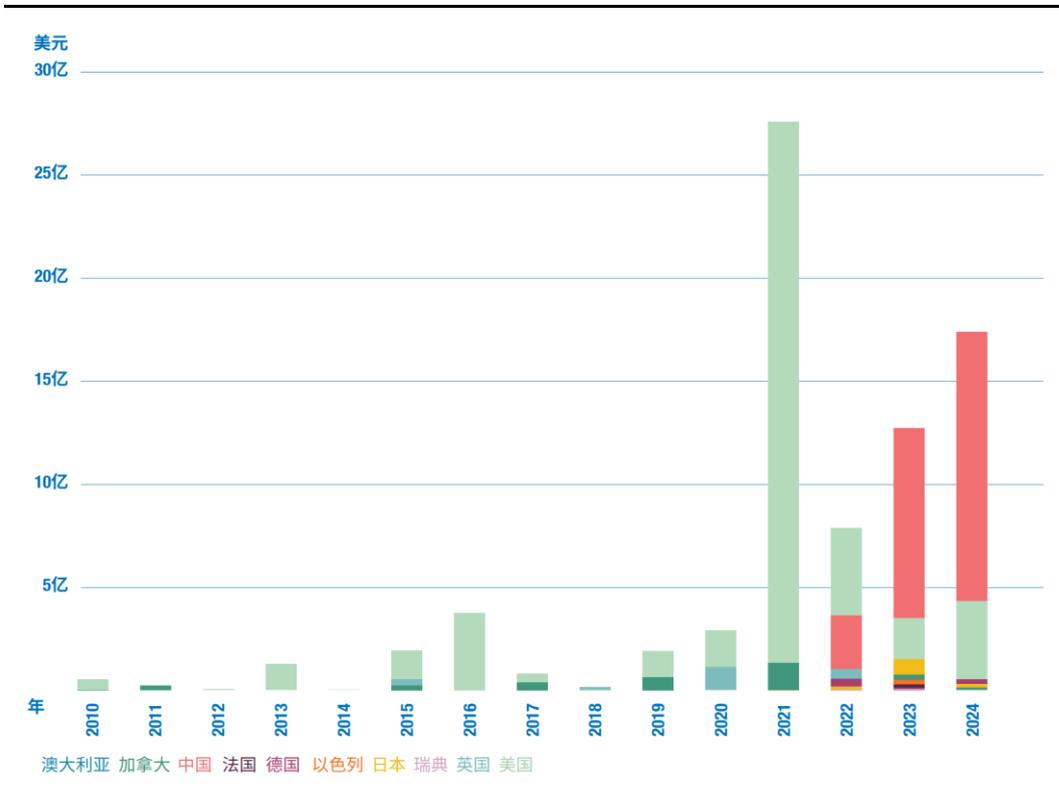
数据来源: Scientific American, 东吴证券研究所

3. 商业聚变公司的定位是什么，其中具有代表性的企业有哪些？

3.1. 为聚变能公司提供的资金正在全球范围内激增

美国和中国在聚变能领域的投资金额都呈现出显著的增长趋势，截至 2024 年，聚变能产业现已吸引了共计 73 亿美元的投资。2021 年至今，美国对聚变能公司的投资金额显著增加，尤其是在 2021 年，投资金额达到了一个高峰，超过 25 亿美元。同时，中国在 2022 年至今对聚变能公司的投资金额也出现了快速提升。2022 年，中国的投资金额显著增加，达到了约 3 亿美元。2023 年和 2024 年，中国的投资金额继续保持在较高水平，支出均保持在约 10 亿美元上下，追赶态势明显。这种快速增长表明中国对聚变能技术的重视程度不断提高，并且正在加大投入力度，以期在这一前沿科技领域取得更大的突破和进展。

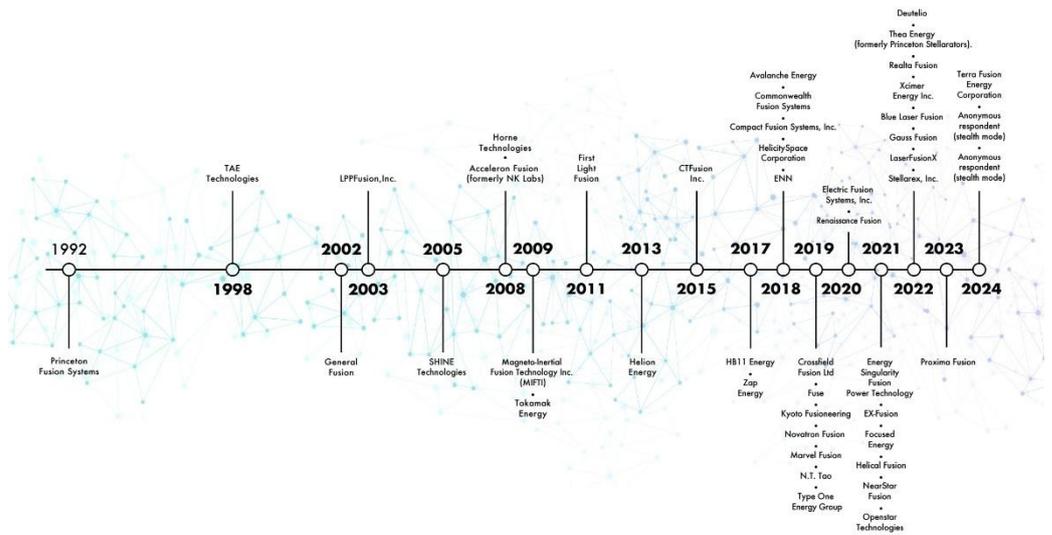
图9：2010-2024 年全球对聚变能公司的权益投资



数据来源：《IAEA World Fusion Outlook 2024》，东吴证券研究所

全球商业可控核聚变公司数量显著增加，绝大多数公司预计将在 2030 年代初实现聚变发电。自 2021 年以来，私营核聚变公司数量从 23 家激增至 2025 年的近 50 家。核聚变工业协会 (FIA) 2024 年调研显示，约 70% 的商业公司预计在 2030 至 2040 年间实现首次并网发电，其中 60% 明确将目标锁定在 2035 年前。尽管 ITER 等大型项目因技术复杂性多次延期，但商业公司的时间表自 2021 年首次公布以来仍保持高度稳定，表明行业正在按计划逐步推进，凸显了对技术路径迭代和工程化落地的信心。

图10: 全球商业聚变公司成立时间线

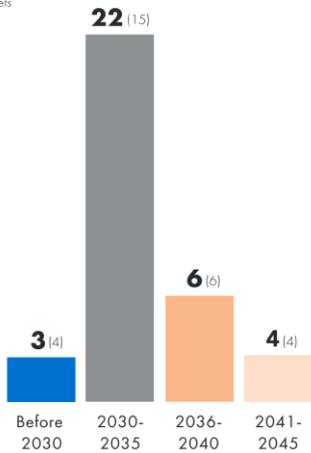


数据来源: 《The global fusion industry in 2024》, 东吴证券研究所

图11: 预计聚变公司何时将向电网供电?

When do you anticipate your company will deliver power to the grid? (35 responses)

*Last year's response in brackets

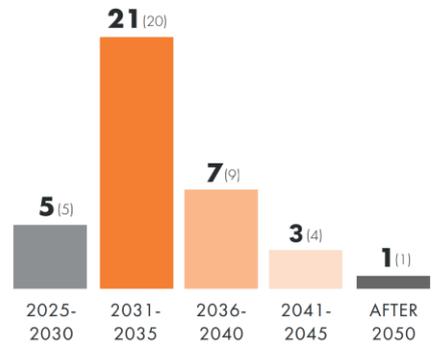


数据来源: 《The global fusion industry in 2024》, 东吴证券研究所

图12: 第一座核聚变发电厂何时将电力输送到电网?

When will the first fusion plant deliver electricity to the grid? (37 responses)

*Last year's response in brackets



数据来源: 《The global fusion industry in 2024》, 东吴证券研究所

3.2. 高温超导磁体技术推动托卡马克装置小型化

上文提及了托卡马克定标率的概念, 此处复述, 托卡马克的约束性能很大程度上取决于装置的尺寸 R 和磁场强度 B 。

$$\tau_E \propto RB$$

τ_E 能量约束时间

R 等离子体环大半径

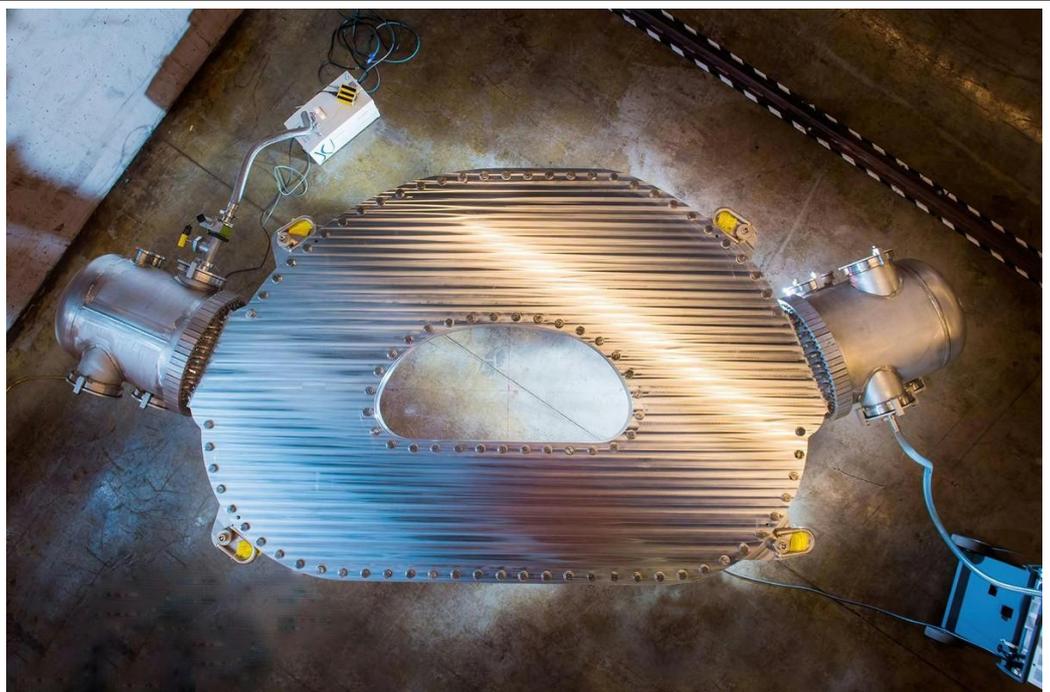
B 磁场强度

高温超导磁体技术的突破正从根本上重塑托卡马克装置的工程范式，单位体积磁体可产生更强的约束磁场，推动托卡马克向小型化、低成本方向跨越式发展。传统托卡马克依赖低温超导磁体，需在液氦温区（4.2K）运行，而高温超导材料如稀土钡铜氧化物（REBCO）的临界温度提升至液氮温区（77K），不仅显著降低制冷能耗达 90%以上，更通过超高磁场强度（实验室已达 45.5T）和电流密度（达低温超导的 2 倍）实现装置尺寸的指数级缩减。

商业聚变公司的托卡马克建造体现了“增强托卡马克磁场强度”这一逻辑，单装置体积及建设成本被大幅压缩。其发展逻辑遵循“小装置、低成本、快速迭代”的原则，通过开发小型化装置，大幅降低建设成本和材料需求，缩短研发周期。例如，星环聚能的第一台实验装置仅重 30 余吨，成本约 1.5 亿元，相比传统大型装置，这种紧凑型设计显著提高了性价比。同时，快速迭代能力使企业能够在短时间内优化技术，解决工程化问题。例如，Helion Energy 自 2013 年成立以来，已快速迭代至第 7 代装置。这种“小而快”的发展模式不仅降低了风险，还为核聚变技术的商业化提供了更灵活的路径。

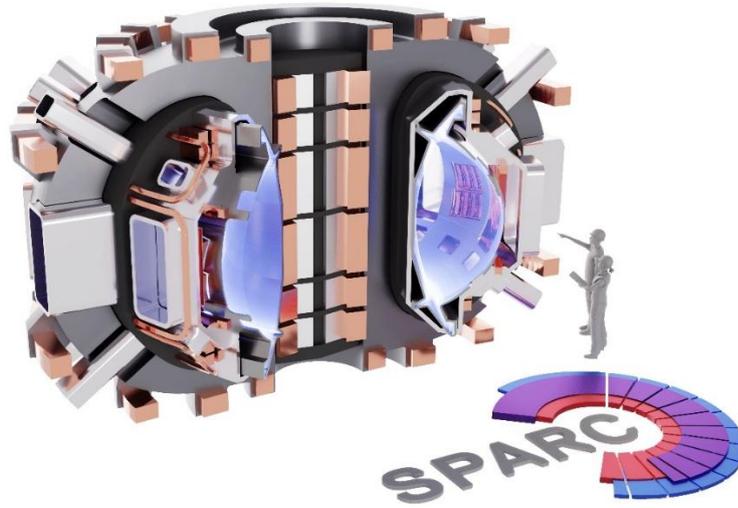
其中的典型例子是美国 Commonwealth Fusion Systems（CFS）公司，其通过创新的高温超导磁体技术显著缩小了托卡马克装置的尺寸，同时降低建设成本和周期。CFS 与麻省理工学院合作开发的 SPARC 项目是一个紧凑型高场托卡马克装置，SPARC 的核心创新在于采用稀土钡铜氧化物（REBCO）高温超导材料，该材料的高临界磁场特性使单位体积磁体可产生更强的约束磁场，从而在更小空间内维持等离子体稳定性。该磁体可产生高达 20 特斯拉的持续磁场强度，远超 ITER 的 12 特斯拉，从而将托卡马克体积缩小至 ITER 的 2%，单装置成本降至 1.5 亿人民币级别，同时减少建设周期。

图13: CFS 使用一种新型高温超导体（稀土钡铜氧化物）制造同类中最强的聚变磁体



数据来源：Commonwealth Fusion Systems，东吴证券研究所

图14: SPARC 是一个小型化的托卡马克装置 (图中有两个人)



数据来源: 麻省理工大学, 东吴证券研究所

CFS 公司的 SPARC 项目旨在实现核聚变反应的净能量增益, 即产生的能量大于维持聚变过程所需的能量, 这一目标的实现将标志着核聚变能源从实验室走向商业化应用的关键一步。SPARC 计划在 2025 年实现首次等离子体放电, 并在 2027 年实现净能量增益, 即产生的聚变能量超过维持聚变过程所需的能量, 并为后续规模化建造 400 兆瓦级商业聚变发电厂 ARC 奠定技术基础。

表2: SPARC 里程碑

	已经完成	正在进行	待办事项
SPARC 选址	✓		
SPARC 建设		✓	
SPARC 生成第一批等离子体			✓
SPARC 能量净输出			✓

数据来源: Commonwealth Fusion Systems, 东吴证券研究所

4. 中国核聚变研究的主力军是谁，分别对应哪些托卡马克装置？

中国可控核聚变研究始于 20 世纪 60 年代初。20 世纪 60 年代初，我国核聚变研究拉开帷幕，以小型托卡马克装置的研制与实验为主，先后建成了 CT-6（中国科学院物理研究所）、KT-5（中国科学技术大学）、HT-6B（中国科学院等离子体物理研究所）、HL-1（核工业西南物理研究院）和 HT-6M（中国科学院等离子体物理研究所）等装置。这些装置虽规模较小，但为我国培养了一批专业的聚变工程队伍，积累了丰富的实验经验。

4.1. “中科院等离子所”与“西南物理研究院”是我国核聚变研究主力

我国核聚变研究的主力军是两个研究所，即“中国科学院等离子体物理研究所”与“核工业集团公司核工业西南物理研究院”，与这两个研究所对应的是两系对我国聚变研究而言非常重要的托卡马克装置。

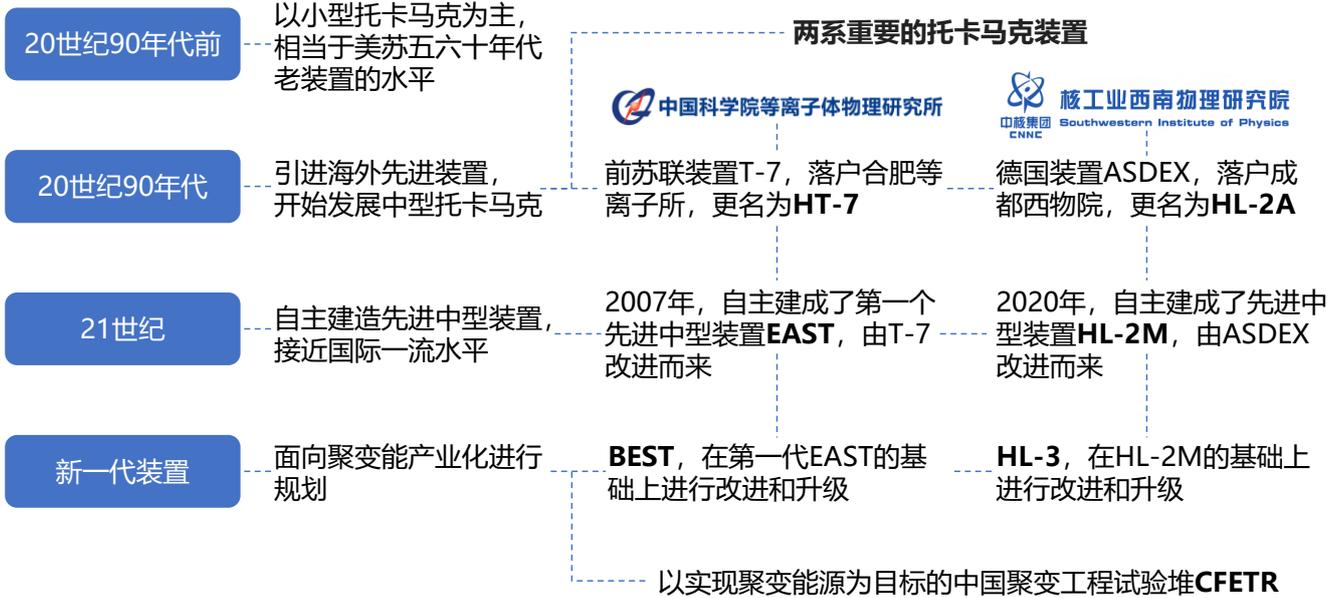
4.1.1. 中科院等离子所

早在 20 世纪 70 年代，该所成功研制了 HT-6B 小型托卡马克装置，开启了我国托卡马克实验研究的先河。随后，HT-6M 于 1984 年建成运行，标志着我国在中型托卡马克技术上的进步。1990 年代，HT-7 超导托卡马克装置建成，成为当时我国规模最大、技术水平最高的托卡马克装置之一。HT-7 在长脉冲等离子体放电和稳态运行方面取得多项成果，积累了丰富的实验数据，为后续装置的研发奠定了基础。进入 21 世纪，该所主持建设的 EAST（东方超环）装置于 2006 年建成并成功放电。EAST 是世界首个全超导托卡马克装置，具有非圆截面、全超导和主动冷却等先进特性，使其在长脉冲高参数运行方面具有独特优势。近年来，EAST 在高约束模等离子体放电、电子温度超过 5000 万度的长脉冲运行等方面取得一系列世界领先成果，成为国际核聚变研究的重要平台。

4.1.2. 西南物理研究院

20 世纪 70 年代，该院建成了 HL-1 托卡马克装置，开启了我国在托卡马克领域的自主研究。1994 年，HL-1M 装置建成并投入运行，其采用反馈控制技术，取代了传统的厚铜壳结构，显著提升了装置的性能和运行效率。HL-1M 在高功率辅助加热、等离子体电流驱动等方面取得重要突破。进入 21 世纪，该院在 HL-1M 的基础上改建了 HL-2A 装置，于 2002 年成功获得初始等离子体。HL-2A 装置具备偏滤器位形，能够开展高参数等离子体的不稳定性、输运和约束等前沿物理研究。2020 年，HL-2M 装置成功放电，标志着我国在高比压、高参数聚变等离子体研究方面迈上新台阶。HL-2M 装置的建成进一步提升了我国在核聚变研究领域的综合实力，为未来聚变堆的建设奠定了坚实基础。

图15: 中国托卡马克装置发展主线



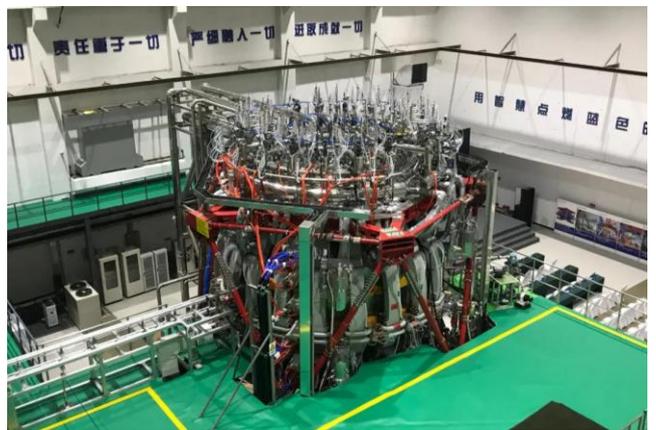
数据来源: 中国核电网, 东吴证券研究所绘制

图16: EAST (中国)



数据来源: 中科院等离子所, 东吴证券研究所

图17: HL-2M (中国)



数据来源: 西南物理研究院, 东吴证券研究所

4.2. 未来中国托卡马克的研究将为 CFETR 的建设奠定基础

BEST 项目与 **HL-3** 项目分别是中科院等离子所与西南物理研究院正在建设或升级改造的托卡马克研究装置。**BEST** (紧凑型聚变能实验装置) 是中国科学院等离子体物理研究所主导建设的下一代核聚变实验装置, 旨在填补现有实验装置与示范堆之间的科学技术差距。其主要目标是实现氘氘聚变功率的长时间运行, 验证聚变氘燃料自持增值和高效取能的技术路线。**HL-3** (环流三号) 是由核工业西南物理研究院负责设计、建造和运行的新一代磁约束核聚变实验装置, 是我国目前设计参数最高、规模最大、最先进的托卡马克装置。其主要目标是解决 ITER 和下一代聚变装置的关键物理和技术问题。

未来重点将在我国磁约束主力装置 BEST 与 HL-3 上开展与 CFETR 物理相关的验证性实验，为 CFETR 的建设奠定坚实的基础。

CFETR 的核心目标是实现可控核聚变能的工程验证与商业化应用，旨在弥合 ITER（纯实验装置）与未来聚变示范发电厂之间的技术鸿沟，推动聚变能源从实验室走向实际应用。CFETR 的定位是作为 ITER 的后续工程，解决 ITER 无法涵盖的关键科学和技术问题，填补实验与示范电站的空白。

CFETR 计划于 2035 年左右建成并投入运行。工程设计阶段，2017 年启动集成工程设计研究，2022 年完成工程设计报告，目前相关超导磁体、冷却系统等关键技术已进入验证阶段；建设与实验阶段，计划于 2035 年左右建成并投入运行，初期聚焦等离子体约束和能量增益实验，将实现 100-200MW 的聚变功率输出；商业化过渡阶段，2040 年代实现 1GW 的净功率输出，2050 年前建成示范聚变电站并向电网供电，最终于 2060 年左右完成商业化原型电站建设。

图18: CFETR 总体鸟瞰图及装置核心组件解剖图



数据来源：科普中国，东吴证券研究所

4.3. 国家项目与商业公司并举，中国商业核聚变公司加速崛起

近年来中国商业核聚变公司蓬勃发展，呈现出加速崛起的良好态势。自 2021 年起，全球核聚变投资快速增长，中国在这一领域也加速布局，形成了国家项目与商业公司并举的格局。目前，中国主要的商业核聚变公司包括星环聚能、能量奇点、聚变新能、瀚海聚能和新奥集团等。

中国商业核聚变领域呈现多元化技术路线竞争格局：

能量奇点和星环聚能分别深耕高温超导托卡马克和球形托卡马克，通过工程创新加速商业化；瀚海聚能挑战主流技术，探索场反位形路线以降低成本和迭代周期；聚变新能依托国家项目资源，推动产业链整合；新奥科技则通过合作参与关键环节。

这些公司均计划在 2030 年代实现示范堆运行，标志着中国核聚变技术从实验室迈向工程化的关键阶段。

图19：中国领先的核聚变商业公司



核心装置

- 洪荒70：全球首台全高温超导托卡马克装置，验证高温超导托卡马克的工程可行性。

下一代装置

- 洪荒170：预计2027年建成，磁场强度为美国CFS公司SPARC装置的110%，体积仅其70%，目标实现能量增益 $Q > 10$ 。
- 洪荒380：计划2030年后启动建设，目标建成可用于示范性聚变发电的装置，推动商业化应用。



核心装置

- SUNIST-2：中国首台联合球形托卡马克装置，磁场强度与等离子体性能国内领先。
- NTST：全球首个原生设计的负三角等离子体托卡马克，为下一代装置CTRFR-1铺路。

下一代装置

- CTRFR-1：计划2027年建成，中型高温超导球形托卡马克，接近聚变堆要求，验证燃料循环、功率输出等关键技术。
- CTRFR-2：目标2032年建成商用示范堆，解决抗中子辐照材料、热负荷管理等难题，推动聚变发电商业化。



核心装置

- 玄龙-50：这是中国首座中等规模球形托卡马克聚变实验装置，于2019年8月建成并成功实现等离子体放电。
- 玄龙-50U：2023年升级后的装置，相关物理性能参数显著提升，已跻身国际上较大型磁约束实验平台行列。

数据来源：可控核聚变，东吴证券研究所

5. 可控核聚变何时能够实现？

回到本文最初的问题：可控核聚变何时能够实现？

当前关于实现可控核聚变时间表的预测之所以缺乏依据，核心在于人类尚未突破实现可控核聚变所需的多维技术瓶颈。现有的托卡马克装置（如 EAST、JET）虽然取得了突破，但距离实现持续能量净增益仍存在巨大鸿沟。等离子体约束时间、超导磁体稳定性、第一壁材料抗辐照性能等关键技术仍处于实验室验证阶段，任何单一参数的突破都无法直接推导出工程化应用的可行路径。

新一代托卡马克装置（如 ITER、CFETR、SPARC）的建造目标正是要系统性验证这些物理参数的协同运行极限，其建设落地的时点，本身就是实现聚变点火的重要节点。在未获取新一代托卡马克装置的全参数运行数据前，基于现有的实验结果进行外推，本质上是在用线性思维预测指数级技术难题。例如，ITER 即便实现设计目标，仍需解决氙自持、材料寿命、经济性优化等衍生挑战，而这些问题的解决周期往往需要以十年为单位迭代。因此，在拥有新一代托卡马克装置的完整实验数据之前，任何关于时间表的论断都建立在未被验证的假设之上，既可能低估工程技术转化的难度，也可能忽视基础物理机制中尚未探明的潜在障碍。

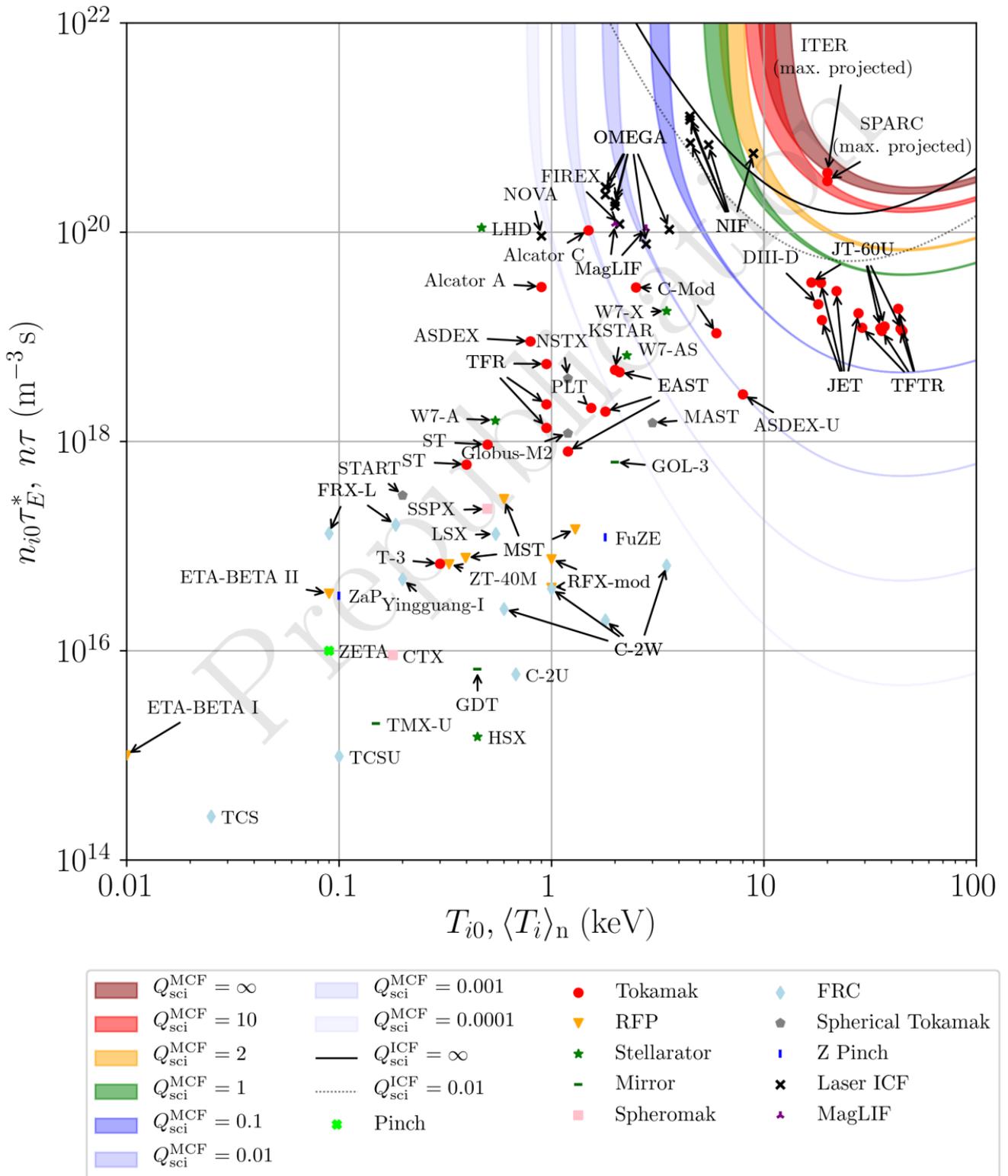
从历史实验数据和当前技术进展来看，ITER 与 SPARC 实现可控核聚变的可能性较高，但其成功仍需时间和持续的技术创新。

表3：全球各个核聚变项目在 2040 年之前实验成功的主观概率

聚变项目	约束方式	资金来源	国家	目标日期	2025	2030	2035	2040
ITER	托卡马克	公共	全球	2035			50%	70%
K-DEMO	托卡马克	公共	韩国	2037				70%
CFETR	托卡马克	公共	中国	2030s				60%
STEP	球形托卡马克	公共	英国	2040				20%
SPARC	托卡马克	私人	美国	2028	30%	70%		
Renaissance	仿星器	私人	法国	2032			50%	70%
Type One	仿星器	私人	美国	2031			50%	70%
Tokamak Energy	球形托卡马克	私人	英国	2030		10%	30%	
Marvel	惯性	私人	德国	-			30%	
Helion	不同	私人	美国	2024	5%	20%		

数据来源：《The Future of Fusion Energy》，东吴证券研究所

图20: 历史实验数据预测 ITER 与 SPARC 可以实现聚变点火 (图中右上角)



数据来源: 《Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion》, 东吴证券研究所

6. 风险提示

技术成熟度不足：可控核聚变的核心技术（如等离子体约束、能量增益、材料耐受性等）仍处于实验阶段。目前最接近商业化的技术路线是托卡马克和仿星器，但尚未实现能量净增益。如果关键技术无法突破，可能导致项目停滞或失败。

技术更新迭代：可控核聚变技术路线多样，每种路线都有其优缺点和不确定性。此外，技术路线的多样化也增加了投资的不确定性，不同技术路线的优劣和可行性尚需时间验证。未来可能出现更高效、更经济的技术路线，导致现有投资贬值。

市场需求不确定性：尽管核聚变能源具有巨大的潜在市场，但目前其市场需求仍处于起步阶段，市场接受度和需求量有限。此外，核聚变能源的经济性、政策环境、公众接受程度以及与其他可再生能源技术的竞争等因素，都会对其市场接受度产生影响。

商业化进程缓慢：可控核聚变从实验堆到示范堆再到商业堆，需要经历漫长的研发和建设周期，预计至少需要 20-30 年。期间可能面临资金不足、技术瓶颈、政策变化等风险，导致商业化进程延迟。

免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

东吴证券投资评级标准

投资评级基于分析师对报告发布日后 6 至 12 个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证 50 指数），具体如下：

公司投资评级：

- 买入：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在 15% 以上；
- 增持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 5% 与 15% 之间；
- 中性：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 -5% 与 5% 之间；
- 减持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 -15% 与 -5% 之间；
- 卖出：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在 -15% 以下。

行业投资评级：

- 增持：预期未来 6 个月内，行业指数相对强于基准 5% 以上；
- 中性：预期未来 6 个月内，行业指数相对基准 -5% 与 5%；
- 减持：预期未来 6 个月内，行业指数相对弱于基准 5% 以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所
苏州工业园区星阳街 5 号
邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>