

聚变时代加速到来，Z 箍缩路线走进主流视野

2025 年 09 月 10 日

► **可控核聚变时代加速到来，2030 年为商业化时期。**可控核聚变因为原料丰富、清静高效、安全性高等优势，被公认为人类的终极能源。但鉴于其技术要求苛刻，给人遥不可及的感觉，业内曾戏称，核聚变距离商业实现永远有 50 年，也就是“50 年悖论”。但 2025 年 7 月聚变工业协会（FIA）发布《2025 年全球聚变行业》报告显示，过去 5 年全球聚变行业呈爆发式增长，总投资额从 2021 年的 19 亿美元飙升至 97 亿美元，仅去年一年就新增 26 亿美元。这一增长态势，充分彰显了投资者信心的成熟、聚变技术的突破以及供应链的快速整合。同时，2030 年代被行业普遍视为聚变商业化关键期。

► **惯性约束技术进展飞快，尤其是 Z 箍缩技术凭借安全性、经济性、持久性和环境友好性等方面的优势表现亮眼。**我国聚变技术过往以磁约束托卡马克为主，惯性约束较少进入公众视野。但根据《2025 年全球聚变行业》数据显示，惯性约束成为仅次于磁约束的技术路线，其中 Z 箍缩技术凭借安全性、经济性、持久性和环境友好性等方面优势逐渐为人受熟知。美国桑迪亚国家实验室的 Z 机器、我国聚龙一号均采用 Z 箍缩技术，使得惯性约束技术进展飞快，同时 ZAP Energy、安东聚变等致力于 Z 箍缩技术商业化的科技企业也纷纷涌现，使得 Z 箍缩技术成为聚变技术重要的可选方案。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的研究人员利用“国家点火装置”（NIF）总能量为 2.05 兆焦耳的 192 路激光束，球对称聚焦在微型氘氚燃料靶丸上，产生了 3.15 兆焦耳的核聚变能量输出。据介绍，该成果跨越了聚变点火阈值，历史性地实现了净能量增益（ $G > 1.5$ ）。与此同时，实验的成功也证实了惯性聚变能源的科学基础。是人类迈向聚变能时代的一个重要里程碑。

► **Z 箍缩技术落地有望大幅拉动驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等领域的投资。**Z 箍缩主要由驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等构成，驱动器选择直线变压器（LTD）技术路线，采用“分而治之”的设计思想，合理降低了器件的功率要求。涉及的关键技术主要包括高产额聚变靶设计技术、重复频率大电流驱动器设计技术、次临界能源堆设计技术以及换靶机构和爆室设计技术。彭先觉院士提出 3 个发展阶段的任务目标，预计 2040 年实现 Z 箍缩技术的商业化发电。1) 关键技术攻关阶段（2024—2030 年）。针对 Z 箍缩的 3 项关键技术同步开展攻关，主要是聚变点火、长寿命重频驱动器和深度次临界能源包层；2) 工程演示阶段（2031—2040 年）。2035 年建成 1000 兆瓦级热功率的池式综合试验堆，采取逐级推进的方式，分步实现集成演示混合堆各项关键技术的演示目标；3) 商业发电推广阶段（2040 年以后）。2035 年开始建设 1000 兆瓦级电功率 Z 箍缩聚变裂变混合堆，2040 年进行发电演示，之后进入商业推广阶段。a 在工程演示阶段的基础上，进一步提高混合堆性能，驱动器运行次数 $> 3 \times 10^6$ 次/a，聚变单发放能约为 2~3 GJ， Q_{Sci} 约为 20~30，包层能量放大倍数 > 15 。b 演示聚变堆发电的经济性。c 建成裂变燃料重整和“简便干法”后处理工厂。d 逐步推广应用。

► **投资建议：**随着 Z 箍缩技术快速发展，商业化路径逐步明朗，建议关注在 Z 箍缩驱动器、靶材、深次临界裂变包层等核心部件有所布局的公司，相关标的有合锻智能、国光电气、王子新材、火炬电子、旭光电子、炬光科技等，同时关注其他配套设备相关标的。

► **风险提示：**可控核聚变技术突破不及预期，下游需求波动风险，国内外政策推动不及预期。

推荐

维持评级



分析师 李哲

执业证书：S0100521110006

邮箱：lizhe_yj@glms.com.cn

分析师 占豪

执业证书：S0100522090007

邮箱：zhanhao@glms.com.cn

相关研究

- 1.一周解一惑系列：具身智能的落地性-以杰克股份与纺织服装场景为例-2025/07/29
- 2.机械行业 2025 年中期投资策略：科技牵头，重视成长赛道机遇-2025/06/18
- 3.一周解一惑系列：聚变磁约束结构仿星器 VS 托卡马克-2025/06/16
- 4.一周解一惑系列：光刻机：半导体技术之巅，国产替代空间广阔-2025/05/28
- 5.一周解一惑系列：机器人算法迭代对视觉方案的影响-2025/05/09

目录

1 可控核聚变时代加速到来	3
1.1 可控核聚变政策支持力度持续加码	3
1.2 核聚变产业投资如火如荼，2030 年为商业化时期	5
2 惯性约束奋起直追，Z-箍缩技术表现显眼	10
2.1 Z 箍缩惯性约束发展历程及基本原理	11
2.2 Z 箍缩关键技术主要体现在三大领域	13
2.3 Z 箍缩技术具备安全性高、经济高效等优点	15
2.4 Z 箍缩经济性预估及发展路线设想	16
3 全球主要 Z 箍缩路线反应堆介绍	18
3.1 美国桑迪亚国家实验室的 Z 机器	18
3.2 中国聚龙一号	19
3.3 美国 ZAP Energy 公司	19
3.4 先觉聚能	21
3.5 安东聚变	21
3.6 美国 Pacific Fusion 公司	22
3.7 美国 Fuse Energy 公司	22
4 投资建议	23
4.1 合锻智能	23
4.2 王子新材	23
4.3 国光电气	24
4.4 联创光电	25
4.5 爱科赛博	26
4.6 英杰电气	27
5 风险提示	28
插图目录	29
表格目录	29

1 可控核聚变时代加速到来

1.1 可控核聚变政策支持力度持续加码

中国在可控核聚变领域的政策布局已形成多层次、多维度体系，涵盖监管框架、产业推进、地方协同及资本支持等方面，旨在加速技术攻关与商业化进程。

1.1.1 国家监管政策：辐射安全与分类管理。

随着我国聚变能研发进入工程化探索阶段，生态环境部于 2025 年 4 月正式发布《关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知》(以下简称《通知》)，首次将聚变装置纳入统一辐射安全监管体系，明确分类管理、许可证制度及审评流程优化等核心要求。该政策旨在应对聚变装置技术复杂性高、辐射风险差异大的挑战，填补传统核裂变堆与粒子加速器监管框架的空白。

《通知》的分类监管机制将聚变装置按风险等级划分为三类：**1) 等离子体物理实验装置 (如托卡马克)**：参照Ⅲ类射线装置管理，需办理环境影响报告表。**2) 氦气聚变实验装置 (如紧凑型聚变装置)**：需编制环评报告书并申请 I 类辐射安全许可证，由生态环境部直接审批。**3) 聚变能应用装置 (如中国聚变工程实验堆 CFETR)**：执行最高风险等级管理，要求全生命周期辐射监测和退役评估。三类装置对应差异化监管。

1.1.2 产业化推进方面：央企主导与创新联合体

2025 年 7 月，中国聚变能源有限公司挂牌成立大会在沪举行。本次正式挂牌的中国聚变公司，作为中核集团聚变能源产业的实施主体、投融资平台及抓总单位，将以磁约束托卡马克为技术路线，按照**先导实验堆、示范堆、商用堆“三步走”发展阶段**，最终实现聚变能商业化应用的任务目标。

中国聚变公司是中核集团直属二级单位。作为推进我国聚变工程化、商业化的创新主体，中国聚变公司将重点布局总体设计、技术验证、数字化研发等业务，并建设技术研发平台和资本运作平台。股东包括中核集团、国家绿色发展基金、浙能电力等，首轮增资约 115 亿元。技术层面，同上海交大、上海电气等组建聚变创新联合体，推动产业链协同。**整体定位是“技术研发+资本运作”双平台。**

1.1.3 地方政策：区域技术集群与重大项目

上海将聚变能源列为前沿产业重点方向，支持高温超导等核心技术攻关。吸引中国聚变公司落户，建设产业集聚区。

2025 年 7 月，上海诺瓦聚变已完成天使轮，金额超 5 亿元。由社保基金中关村自主创新专项基金、君联资本、光速光合、高榕创投、华控基金、明势创投及临港科创投等领投，资金将重点投入研发国内首台小型模块化核聚变反应堆。

上海诺瓦聚变主研 FRC-SMR 技术，公司短期目标是实现 1 亿度离子聚变温度，完成关键技术验证；中期目标是达成聚变能量增益 $Q > 1$ ，攻克经济高效获取聚变能的核心难题；长期目标是实现聚变能量增益 $Q > 10$ ，完成 FRC-SMR 研发，并在 2035 年实现模块化聚变电站的商。

四川将依据重大工程带动聚变技术突破。2025 年 7 月，四川省发布《关于发展壮大新兴产业加快培育未来产业的实施方案（2025—2027 年）》，提出以重大工程带动磁约束、惯性约束核聚变技术突破。方案明确加快建设准环对称仿星器，争取聚变堆关键技术攻关工程落地，并依托中国工程物理研究院推进电磁驱动聚变大科学装置建设。同时，四川将发展激光聚变能源工程，开展相关技术研发并拓展商业化应用。

表1：中国聚变政策支持要点

维度	核心政策	目标
监管体系	分类管理、审评合一	安全与效率平衡
产业组织	央企牵头+创新联合体	技术攻关与工程化落地
区域布局	上海（工程化）、四川（重大装置）	形成互补产业集群
资本路径	国家队投资+民间资本参与	加速商业化进程

资料来源：核聚变与等离子体物理，芒果财经等，民生证券研究院整理

1.1.4 世界各国纷纷出台核聚变相关支持政策

美国提出三大战略支柱推动聚变能商业化。美国能源部与白宫科技政策办公室在白宫联合发布《2024 年聚变能战略》，提出了能源部在聚变领域战略的三大支柱，分别是：**缩小商用聚变科技差距；为商业化聚变能源铺平道路；建立和利用内外部伙伴关系。**三大支柱涵盖科研合作、关键领域、商业准备、国内外合作、市场培育等内容，为美国聚变产业发展提供系统性指导。重点从资本流动、氦供应、核不扩散框架、公众认知与劳动力、废料管理等方面提出了聚变商业化背景、可能面临的挑战以及具体措施。

英国成为全球首个专项规划规则制定国，战略定位旨在巩固英国在“全球聚变竞赛中的领导地位”。具体体现在以下几个方面：1) 国家重大基础设施项目机制：2025 年 7 月宣布将聚变项目纳入该机制，与核裂变、可再生能源同等对待，结束地方审批无固定时间表的历史。通过国家政策声明明确选址与开发周期，目标缩短项目落地时间。2) 资金与工程部署：预计投入 25 亿英镑研发，重点推进 STEP 示范电站（球形托卡马克），目标 2040 年在诺丁汉郡投运，成为全球首个商用级聚变电站。3) 产业联动：英国原子能管理局（UKAEA）启用 3D 打印技术制造聚变组件，加速工程化应用。

日本公布核聚变国家战略修订草案，将原定 2050 年前后实施发电实证的时

间正式上调为 2030 年代。日本在 2025 年 6 月发布《聚变能源创新战略》修订版，将发电实证时间从“2050 年前后”提前至 2030 年代，定位为“增强全球竞争力的新兴产业支柱”。同时成立内阁府专项工作组，统筹技术成熟度评估、选址规划及法律框架设计，2025 年内完成组建。

俄罗斯修订《原子能利用法》，构建聚变反应堆及装置的安全监管体系。2025 年 2 月，俄罗斯联邦政府会议审议通过了由联邦环境、工业与核监督局提交的《关于修改〈原子能利用法〉第 3 条》的联邦法律草案。该法案旨在构建聚变反应堆及装置的安全监管体系，标志着俄罗斯在聚变能研究领域迈出重要一步。

表2：各国聚变支持政策要点

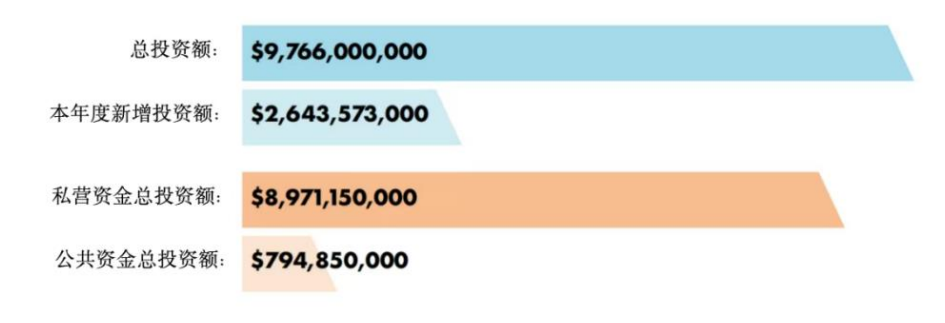
国家	核心目标	监管框加创新	资金/工程部署
美国	十年商业化愿景	三大支柱战略+氦工供应链保障	公私合营中试厂设计
英国	2040 年 STEP 电站投运	首设聚变专项规划规则	25 亿英镑研发基金
日本	2030 年代发电实证	内阁工作组统筹+RI 法监管	加速原型堆研发
俄罗斯	设施安全分级管控	修订原子能法拓展至聚变	国家计划技术改建

资料来源：中核智库，可控核聚变，北极星核电网等，民生证券研究院整理

1.2 核聚变产业投资如火如荼，2030 年为商业化时期

2025 年 7 月 21 日，聚变工业协会（FIA）发布《2025 年全球聚变行业》报告。该报告基于对 53 家聚变企业的调研数据显示，**过去 5 年全球聚变行业呈爆发式增长，总投资额从 2021 年的 19 亿美元飙升至 97 亿美元，仅去年一年就新增 26 亿美元。**这一增长态势，充分彰显了投资者信心的成熟、聚变技术的突破以及供应链的快速整合。值得注意的是，尽管过去五年并非科技领域的投资高峰，但聚变行业却逆势上扬，这体现出其作为安全、无限且清洁的能源解决方案所具有的吸引力。

图1：全球聚变行业融资额大幅增加



资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

公私合作不断深化。今年，企业披露的公共资金投入增长 84%，总额增加近 3.6 亿美元，达到约 8 亿美元。这一数据背后，不仅体现了私人资本对聚变长期效益的看好，也反映出政府对该产业的重视。各国已意识到培育聚变产业在促进就业、扩展供应链方面的经济价值。过去一年里，日本、德国、中国、英国、美国、韩国、加拿大及欧盟等国家和地区，纷纷出台政策加大对聚变项目的布局力度。

投资者多元化趋势显现。聚变领域的资金来源日益多样化，这一趋势反映出各类资本对该领域的信心持续增强。今年的调查显示，投资方涵盖 DCVC、Leitmotif、Breakthrough Energy Ventures 等科技风投机构；雪佛龙、西门子能源、Nucor 等工业巨头；还有 In-Q-Tel、欧洲创新理事会基金、Plynth Energy 等主权及公共基金；以及壳牌、Energy Impact Partners 等能源领域投资者。电信、房地产、国防等多元领域的投资者也纷纷入局，再加上家族办公室和 Google 等科技先驱的参与，充分凸显出聚变产业的吸引力已超越传统高科技或清洁能源圈层。

图2：聚变领域投资者呈现多元化特征

3i Ventures	ENN Group	Playfair VC
Addition	EQT Ventures	Plynth Energy
Athos	European Innovation Council Fund	PRIMEPULSE
Avila VC	Fukikara	Sam Altman
b2ventures	Furukawa Electric	Santander
BAM Elevate	Future Ventures	Shell Ventures
Bayern Kapital	Granitor	Siemens Energy
Breakthrough Energy Ventures	GSBackers	SiteGround
BW Group	HV Capital	Softbank Vision Fund 2
Capricorn Investment Group	Industrial47 Venture Studio	Soros Fund Management LLC
Chevron Technology Ventures	Industrifonden	Special Invest
Chishima Real Estate	In-Q-Tel	Speedinvest
Climentum	Nichicon	Strl
Crédit Mutuel Impact	Itchu	Tengelmann Ventures
DCVC	K-CAP	Thales
Delight Ventures	Khosla Ventures	Tilletown Tech
Deutsche Telekom	Leitmotif	Tom Enterprise
General Catalyst	Lightspeed Venture Partners	Unit-E, Axon Partners
Good Ventures Foundation	Lowercarbon Capital	WARF Ventures
Google	Marubeni	Mayfield
Earlybird VC	Mithril Capital	Xplor Ventures
Ecosphere Ventures	Miyako Capital	A complete list of reported investors over all time is available in previous year's reports: www.fusionindustryassociation.org/fusion-industry-report-archive
Virginia Venture Partners	Mizuho Financial Group	
Emerson Collective	Nucor	
Energy Impact Partners	NVTRN Supporters	

资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

表3：部分重点企业产业融资案例

企业	融资进展	商业化里程碑
Helion (美国)	F 轮融资 4.25 亿美元 (2025 年 1 月)	Orion 电厂开建，2028 年向微软供 50MW 电力
CFS (美国)	累计 20 亿美元	与谷歌签 200MW 供电协议，SPARC 装置 2026 年运行
上海诺瓦 (中国)	天使轮 5 亿美元 (2025 年 8 月)	研发首台小型化反应堆 (FRC-SMR)
Pacific Fusion (美国)	A 轮 9 亿美元 (2024 年)	突破脉冲磁惯性约束技术 (Z 箍缩)，加速中试厂建设

资料来源：华尔街见闻，财富动力网，第一财经等，民生证券研究院整理

磁约束路线及氘氚燃料为行业主流选择。在技术路线选择上，磁约束路线占据着绝对主导地位，共有 25 家公司采用该路线，占比高达 49%。其中，托卡马克和仿星器是最典型的实现方式，惯性约束路线位居次席。燃料组合方面，氘氚方案成为主流选择，共有 36 家公司采用该方案，占比超过三分之二，氢硼方案排名第二。

图3：磁约束技术为主流技术路线



资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

图4：氘氚为主流燃料组合

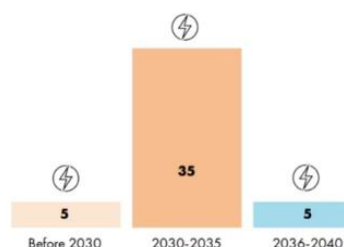


资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

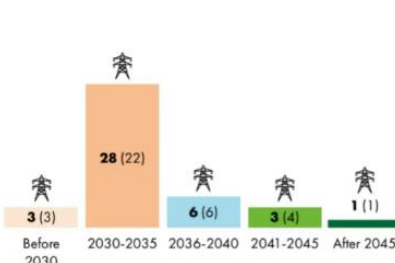
2030 年代是行业公认的实现商业化时期。FIA 的《2025 年全球聚变行业》显示，2030 年代被行业普遍视为聚变商业化关键期。45 家受访公司中，35 家预计在 2030 - 2035 年开始运营具有净能量增益的商业示范电站。28 家公司预计将在 2030 - 2035 年实现并网，而在 2040 年之前实现并网发电已成为绝大多数商业聚变公司的共识。这也意味着，聚变技术已跻身具备近期商业化潜力的新兴能源技术之列，聚变行业正迈入决定其发展的关键十年。

图5：2030 年是行业公认的实现商业化时期

何时开始运营商业示范电站？



何时实现并网发电？



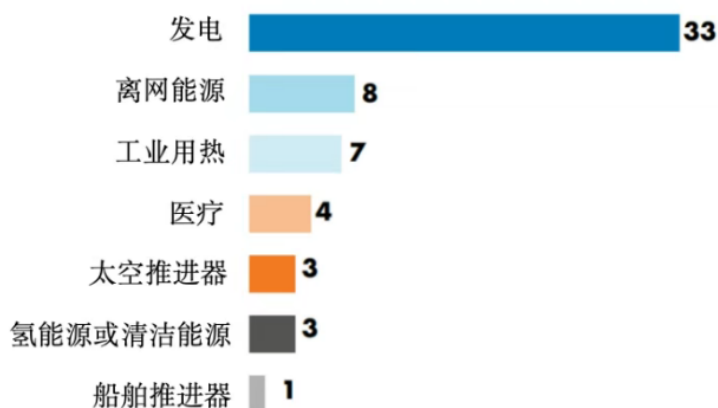
资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

聚变能目标市场聚焦三大核心领域。聚变公司的市场布局虽呈现多元化特点，但核心仍聚焦于发电、离网能源、工业用热三大领域。与此同时，医疗、太空推进

和氢能源领域展现出良好的发展潜力，而船舶推进作为新兴方向也已开始受到关注。

图6：聚变能目标市场聚焦于发电、离网能源、工业用热三大领域

目标市场

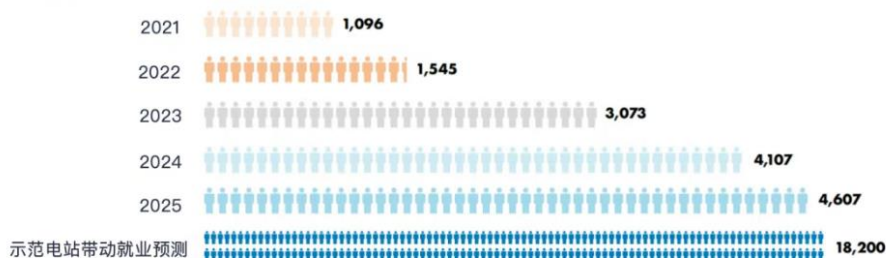


资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

聚变人才队伍持续扩大。目前，全球聚变公司的员工总数已突破 4600 人，较 2021 年增长逾四倍，同时还支撑着至少 9300 个供应链相关岗位。若将建设示范电站所需的劳动力计算在内，直接雇员总数将超过 18000 人。这一系列数据表明，聚变已不再局限于科学探索的范畴，而是演变为一场全球性的工业运动。

图7：聚变人才队伍持续扩大

聚变公司雇员人数



资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

整体而言，聚变行业的五大发展趋势：1) 资本持续涌入，即使在全球经济紧缩期仍保持增长；2) 公私合作扩大，美、英、德、日、中等国政府通过风险共担

加速商业化进程；3) 企业成熟度提升，从原型机研发转向更多维的系统性工程及示范电站制造；4) 投资者多元化，涵盖科技风投、工业巨头、主权基金和能源战略投资者；5) 人才吸引力增强，雇员数量、专业领域和全球化程度显著提升。

当前全球聚变领域的发展趋势已十分清晰：聚变不再是那句“永远还需 20 年”的遥远梦想，而是正在逐步落地的现实技术。未来几年的发展，不仅将决定相关企业的成败，更关系到人类能否兑现数十年前发现聚变潜力时许下的承诺：为世界提供安全、无限且清洁的能源。

2 惯性约束奋起直追，Z-箍缩技术表现显眼

磁约束路线为行业主流选择，惯性约束路线奋起直追。在技术路线选择上，磁约束路线占据着绝对主导地位，共有 25 家公司采用该路线，占比高达 49%。其中，托卡马克和仿星器是最典型的实现方式，惯性约束路线位居次席。

图8：惯性约束路线奋起直追



资料来源：聚变工业协会（FIA），民生证券研究院

惯性约束核聚变，是指利用物质的惯性在极短的时间内将聚变燃料压缩和加热到极高的密度和温度，使其达到发生核聚变反应的条件，并在燃料因巨大的压力而飞散开来之前完成聚变燃烧。这种物质惯性，可以通过高功率激光器产生，Z 箍缩驱动器、离子束驱动器（目前基本没有人提离子束驱动聚变方案）产生。

在惯性约束核聚变中，激光驱动和 Z 箍缩是两种主要的实现方式。激光驱动通过高能激光束对靶丸进行均匀辐照，使靶丸表面迅速蒸发并产生反作用力，进而压缩靶丸内部燃料，形成高温高压环境以触发聚变反应。Z 箍缩则利用等离子体在轴向强大电流产生的洛伦兹力作用下形成径向自箍缩效应，实现燃料压缩。尽管这两种方式在理论上有其独特优势，但在实际应用中仍面临诸多挑战。例如，激光驱动需要极高精度的光束对准和能量均匀分布，以避免靶丸压缩不均导致能量损失；而 Z 箍缩则需要极高的电流强度和稳定的时间控制，以确保等离子体压缩的对称性。此外，无论是激光驱动还是 Z 箍缩，都需要在极短时间内实现燃料的充分压缩和加热，这对能量输入系统的效率和重复运行能力提出了极高要求。

目前，惯性约束聚变已经实现了科研级聚变点火，而磁约束聚变还没有实现过任何性质的聚变点火。聚变点火是能量输出/输入的概念，比起三重积，是更基础准确、更有共识的聚变能源的阶段性里程碑。惯性约束的特点是短脉冲(约束时间仅 10^{-9} s)间断运行的，堆芯为高温高密度等离子体(达到点火条件时，温度为 10^8 K，等离子体的粒子数密度大于 10^{32}m^{-3} ，在这瞬时，等离子体中的压强高达 10^{12}

个大气压)。由于驱动源和聚变堆在空间上是相互分离的,因此惯性约束聚变堆将比磁约束聚变堆简单得多。目前,制约惯性约束实现系统性聚变点火的主要困难一是电能转换为激光能量的效率太低(低于 5%,对于激光 ICF 而言)。另外,目前驱动器的能力还远远达不到实现聚变点火的条件(对于 Z 箍缩而言),以及超热电子对燃料的预热产生辐射不均匀性并引起等离子体的不稳定性扰动等。也有人考虑用高能离子束作惯性约束的驱动源,其优点是离子束在等离子体中具有很好的能量沉积特性,能量的转换效率高;其缺点是需要建造离子加速器作驱动器,这就使得系统变得很复杂,同时也大大增加了装置的成本。除以上困难而外,惯性约束也同样需要面对如何传热、排灰和高能中子的处理等难题。

2022 年 12 月 13 日,美国能源部部长詹妮弗·格兰霍姆宣布,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的研究人员利用“国家点火装置”(NIF)总能量为 2.05 兆焦耳的 192 路激光束,球对称聚焦在微型氘氚燃料靶丸上,产生了 3.15 兆焦耳的核聚变能量输出。据介绍,该成果跨越了聚变点火阈值,历史性地实现了净能量增益($G>1.5$)。与此同时,实验的成功也证实了惯性聚变能源的科学基础。是人类迈向聚变能时代的一个重要里程碑。

2.1 Z 箍缩惯性约束发展历程及基本原理

2.1.1 Z 箍缩技术发展历程

海外 Z 箍缩研究进展

Z 箍缩聚变研究始于 20 世纪 50 年代中期,但直到 20 世纪末才引起全世界的广泛关注。1997 年 Sandia 实验室在驱动电流为 20 MA 的 z 装置上取得的里程碑意义的突破,预示着 z 箍缩可以经济地提供强大的 x 射线源,在聚变能源研究方面发挥重要的作用。之后 Sandia 实验室与 LLNL, LANL 等实验室合作,在 z 箍缩电磁内爆实验、物理及聚变靶的研究与设计方面开展了大量工作,提出了实现聚变的两类概念模型(动态黑腔模型和双端驱动模型)。同时对 z 装置进行了改造升级(ZR 装置),将驱动电流由 20 MA 提升至 26 MA。此外,还与俄罗斯合作,在能源应用的重复频率大电流驱动器方面提出了 LTD 方案(俄罗斯大电流研究所的思想)。他们预计,60 MA 左右驱动电流可以开展聚变研究,90 MA 左右电流的驱动器可以用于产生能源。上述工作为聚变能源研究做出了重要贡献,但目前看来, Sandia 实验室并未解决高产额靶的设计技术问题。他们所展示的聚变靶借鉴了激光驱动 ICF 靶,而这种靶所需的条件在 z 箍缩驱动中(即使是在激光驱动中)难以实现。因此 Z 箍缩驱动聚变能源研究还处在艰难的探索之中。

俄罗斯非常重视 z 箍缩研究,主要研究单位有库尔恰托夫研究院、新能源研究所、电物理研究所、大电流研究所等,已经建成的驱动装置包括 S-300(驱动电流 2-3 MA)和 Angara-5(驱动电流 4-5 MA)。他们提出了“丝阵”负载概念和实现重

复频率运行的 LTD 型驱动器概念。目前又成立了全国性的 z 箍缩研究联合体，准备在 2019 年前建成可以研究聚变点火的 Baikal 装置，驱动电流预计将达到 50 MA 量级。

国内 Z 箍缩研究进展

2000 年，中物院着手开展 z 箍缩研究，到目前为止，已逐步成立了理论、实验、测试、制靶和驱动器五位一体的研究团队。同时利用国内的“阳”、“强光一号”加速器以及俄罗斯 S-300、Angara-5 等装置，持续开展了十几年的 z 箍缩研究，获得了多项国家自然科学基金重点项目资助，并与国内外多个研究机构建立了较为密切的合作关系。

2002 年中物院启动驱动电流达 8-10 MA 的 PTS(“聚龙一号”)装置研制，目的是初步掌握驱动器的建造方法，并为 z 箍缩研究提供更有力的实验平台。该装置于 2013 年建成，目前已可用于物理实验。2004 年前后，鉴于“中心点火”靶思想在 z 箍缩驱动状态不大可行。于是开始探索“局部整体点火”技术路线，并获了基本可行的认识。2008 年，开始先进混合堆概念研究(联合了国内许多单位)、提出了“先进次临界能源堆”概念。同年 10 月，中物院科技年会发表了题为“z 箍缩核聚变核能源：一条值得探求的科技之路”的报告，正式提出了 z 箍缩驱动聚变裂变混合堆概念。2010 年，“Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆总体概念设计研究”获得支持，参加此项目研究的有国内多个单位。2013 年，研究团队研制了输出电流约为 10 MA 的强流脉冲功率装置，接近美国的 Z 装置性能。2020 年，研究团队研制了与 50 MA 驱动器单支路同等规模的 LTD 单路样机装置；实验定标和理论分析表明，50 MA 驱动器可以实现点火和大规模放能。2021 年，“电磁驱动大科学装置”项目获得立项，采用 LTD 技术路线，重点验证“局部体点火靶”技术，同时为 Z FFR 重频驱动器研制积累工程经验。2023 年，研究团队研制了大功率超快半导体开关，可以满足 Z FFR 驱动器重频长寿命的应用需求。

目前已经就 Z 箍缩的主要方面开展了研究，并形成了基本技术路线和初步概念方案。该概念方案与当前研究的其他核能方案相比，在安全性、经济性、持久性和环境友好性等方面都显示出良好的优越性。

2.1.2 Z 箍缩技术基本原理

Z 箍缩主要由 Z 箍缩驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等构成。Z 箍缩驱动器选择直线变压器 (LTD) 技术路线，采用“分而治之”的设计思想，合理降低了器件的功率要求。理论上，一种基本放电单元如果能够重频长寿命运行，且输出时间抖动满足波形叠加要求，就可以基于该基本放电单元并采用 LTD 电路拓扑结构建立任意规模的驱动器。Z 箍缩驱动器产生约 60 MA 的电流，电流上升前沿约为数百纳秒。电流沿 Z 轴方向流过薄金属套筒型负载，产生径向箍缩效应：强

大的洛伦兹力驱动套筒以每秒数百千米的速度内爆，碰靶动能 $>10\text{ MJ}$ ；套筒碰到靶外的能量转换层后产生强X射线辐射；X射线能量经黑腔均匀化形成近球对称的辐射场，在聚变靶丸的烧蚀层内形成高温和高压并对内部物质区进行压缩，从而创造出聚变点火及燃烧所需的环境条件。

图9：Z 箍缩概念示意图



资料来源：彭先觉等《Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究》，民生证券研究院

Z 箍缩驱动器能量充足、电能转换为碰靶动能的效率 $>10\%$ 、造价相对低廉、辐射能品质优良（辐射到聚变靶丸表面能量均匀度为 $1\%\sim 2\%$ ），相较激光器更适合作为惯性约束聚变能源。采用创新设计的“局部体点火靶”，单发聚变放能可达 $2000\sim 3000\text{ MJ}$ ，若驱动器每 10 s 放电 1 次，聚变功率可达 $200\sim 300\text{ MW}$ 。聚变产生的高能中子在深次临界裂变包层内引发裂变反应，再将聚变能量放大 10 倍以上，即可实现 1000 MW 以上的电能输出。

2.2 Z 箍缩关键技术主要体现在三大领域

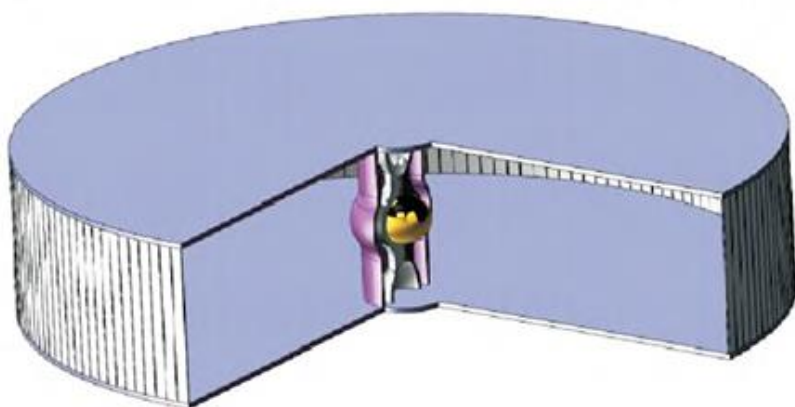
Z 箍缩 (Z-箍缩驱动聚变裂变混合堆) 涉及的关键技术主要包括高产额聚变靶设计技术、重复频率大电流驱动器设计技术、次临界能源堆设计技术以及换靶机构和爆室设计技术。其中以前三项最为关键，涉及技术路线的选择、工程实现的可能性、经济性等诸多问题，第四方面更多涉及工程问题。

高产额聚变靶设计

首先，z 箍缩内爆等离子体主要沿径向飞行，方向性很强。利用“中心点火”模型设计的聚变靶将难以实现高度球对称压缩，也难以控制其能量加载的时间行为。其次，若采用柱对称压缩技术路线，压缩度又成为难题，很难实现既点火、又很好燃烧，也难以达到所希望的燃耗深度，即难以释放出足够的聚变能量。再次，尽管 z 箍缩能量充足，但要实现完全的整体点火所需要的能量高，工程代价巨大。因

此采用将柱形内爆等离子体套筒动能转化为辐射能以实现球对称压缩的技术路线，同时要求聚变靶对压缩对称性不十分敏感。为此，提出“局部整体点火”技术路线，该系统对压缩对称性的要求远低于“中心点火”模型，更适合在 z 箍缩驱动条件下使用。

图10：Z 箍缩带阵负载概念设计示意图



资料来源：彭先觉等《Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究》，民生证券研究院

重复频率大电流驱动器设计

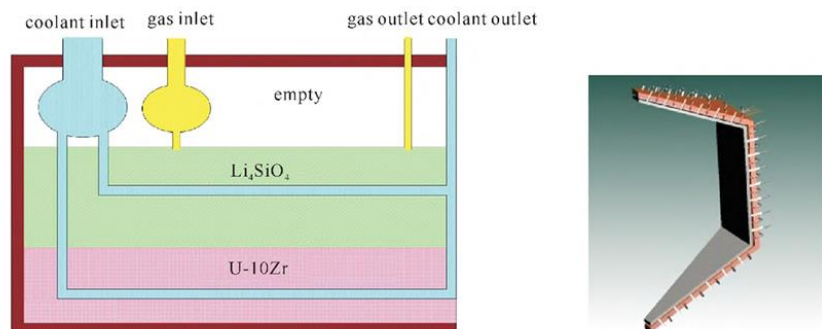
驱动器研究设计主要考虑两大核心问题：1) 建造用于聚变研究的峰值电流大于 60 MA、上升前沿 100-300ns 的驱动器是否存在难以逾越的困难；2) 建造用于聚变能源堆的重复频率驱动器(重复运行频率约 0.1Hz，1 年以上长寿命，长磁绝缘传输线等)是否存在难以逾越的困难。

目前国内在该方向的主要进展包括：1) 建成了 PTS 装置，积累了大量中等电流驱动器设计、建造、安装、调试相关知识和经验，加深了对驱动器物理的认识；2) 基于 LTD 技术设计了 4.5MV / 1MA 单路验证装置，已建成的 LTD 模块性能良好；3) 加强驱动器与靶物理的结合，对驱动器指标提出了更为合理的要求(如上升前沿由小于 100ns 至小于 300 ns，负载半径扩展至 6cm 左右)，有利于缓解驱动器建造难度；4) 提出了 LTD 型驱动器初步设想方案，电容器工作储能小于 100MJ (意味着能源系统能量增益 $Q \geq 100$)。

次临界能源堆设计

次临界能源系统可以将裂变堆的可应用性提高到了一个新的水平，并为聚变技术的及早应用创造良好的条件。

图11: Z 箍缩次临界堆模块结构示意图



资料来源: 彭先觉等《Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究》, 民生证券研究院

整体而言, 次临界堆具备以下优点: 1) 次临界能源堆无临界安全事故, 且易于实现非能动余热安全, 避免出现放射性泄露事故, 具有很好的固有安全性, 不需要场外应急系统; 2) 次临界能源堆能够烧 U-238 和 Th-232 燃料, 并可以从天然铀燃料开始, 铀利用率大于 80% 且少受资源约束, 因而可以成为千年能源; 3) 能量放大倍数 M 大于 10, 可达 20 甚至更高。因而大大降低了对聚变技术的要求, 可促进聚变技术商业化运用; 4) 核燃料制造和循环简单, 换料周期长, 核废料少, 易处理(多数裂变产物半衰期较短), 具有很好的经济性; 5) 不需要进行铀钚循环, 也不依赖铀同位素分离, 具有独到的防核扩散功能; 6) 具有较好的嬗变功能, 且在核燃料循环过程中基本不向外界排放放射性物质。所产生的次锕系元素基本都被嬗变掉, 是非常清洁环保的能源系统。

2.3 Z 箍缩技术具备安全性高、经济高效等优点

Z 箍缩有裂变包层的辅助, 聚变部分只需达到 $Q_{\text{Eng}} = 1$ 的水平即可实现聚变能源利用。聚变放能规模降低、高能中子辐照损伤减弱、氦初始投料量减少, 提高了整体系统的经济性; 裂变包层还提供富裕中子, 在实现氦自持的同时可以显著提高铀资源利用率、减少高放射性废物产生量。考虑到聚变裂变结合会增加工程复杂度, Z 箍缩采用天然铀或者压水堆乏燃料为燃料, 借鉴成熟的压水堆技术并采用简化包层设计、延长换料周期、执行“简便干法”后处理等措施, 更加利于工程实现。

按照传统观点, 聚变是清洁的终极能源, 混合堆因引入裂变而不是理想的选择。实际上, 无论是磁约束聚变还是惯性约束聚变, 作为能源应用时只能以氘、氚作为燃料; 氚具有很强的放射性, 聚变堆涉氚量为千克量级, 如果发生氚的大规模泄露事故, 放射性危害将长达数十年。Z 箍缩大幅减少氚的用量(爆室中的氚仅为 10 毫克级), 显著降低氚的泄露风险; 裂变部分是固有安全的, 在借鉴核工业的成熟经验后并不会增加放射性风险。此外, 氘、氚聚变算不上终极能源, 主要受制于可开采的锂资源量; 如果采用钍增殖中子, 还需考虑钍资源的限制。陆地上的锂资源可以供应数百年, 陆地上的铀资源可以供应上千年。Z 箍缩裂变放能是聚变放能的

10 倍以上，供能时间长达数千年，是人类未来理想的能源选择。

整体上，Z 箍缩的应用优势表现在 4 个方面。 1) **固有安全。** Z 箍缩处于深度次临界运行状态，绝对不会发生超临界事故；非能动余热排出系统等多项措施可确保余热安全；涉及放射性操作的部分置于地下，地上、地下部分完全封闭并隔离。

2) **经济高效。** 如果不采用混合堆的技术路线，电功率为 1000 MW 的 Z 箍缩聚变堆需要由 10 个小聚变单元组成，相应的系统造价是难以承受的。同等规模的 Z 箍缩只需要 1 个驱动器，总建造成本约为 30 亿美元，与第三代热中子反应堆相当。3) **千年持久。** Z 箍缩可以方便持续地燃烧铀-238、钍-232，相应的资源利用率>90%，较热中子反应堆提高两个数量级。根据掌握的陆地铀资源储量，如果单独用于能源供给，可以满足数千年的需求。4) **环境友好。** 采用“简便干法”后处理过程，可分别处理不同的放射性核素。放射性核素量仅有 200 kg/a，半衰期 30 a 以上的长寿命核素均为 β 衰变，处理方便。堆外可设置厚的水屏蔽层，使环境处于极低放射性水平。三回路水系统可实现准闭式循环。这些措施简便电厂的场址选择与长期服役。

2.4 Z 箍缩经济性预估及发展路线设想

Z 箍缩装置主要包括 60-70 MA 级驱动器、次临界能源堆、靶和负载工厂、氟工厂和燃料循环几大系统组成。

Z 箍缩在经济性上具有明显的优势，比快堆便宜、安全、且后续运行费用较少；比热堆稍贵但能成为千年能源并具有多项优点；比纯聚变堆经济性更高，技术难度大为减小，且安全性与环境友好性可以比拟。

Z 箍缩运行时物质消耗量小、产生的废料少(每年仅消耗 1 t 天然铀，产生约 1t 废料，处理废料消耗的资源少；快堆建造成本主要由大量的初始钚装料和燃料元件的制造成本构成；热堆尚未考虑乏燃料和废料处理成本。

图12：Z 箍缩建造成本估算与经济性评估

cost of the main parts	cost/U. S. dollar(in billion)				
	Z-FFR		pure fusion reactor	fast reactor	thermal reactor
	part	total			
driver (60~70 MA)	≤ 1				
sub-critical power reactor	1				
target and load plant	0.3	about 3	≥ 10	5~6	about 2
deuterium plant and fuel recircling	0.7				

资料来源：彭先觉等《Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究》，民生证券研究院

在 Z 箍缩概念研究能够比较明确地给出路线可行性判断的基础上，瞄准 2040 年实现 Z 箍缩商业化供能目标论证发展规划，提出了 3 个发展阶段的任务目标。

1、关键技术攻关阶段（2024—2030 年）

针对 Z 箍缩的 3 项关键技术同步开展攻关，为后续工程建设筑牢基础。1) 聚变点火。建设输出电流为 50 MA 的 Z-箍缩“电磁驱动大科学装置”，验证“局部体点火靶”聚变能源技术路线的可行性，在国际上率先实现单发聚变百兆焦级放能、 $Q_{\text{Eng}} > 1$ 。2) 长寿命重频驱动器。功率源充放电 $> 3 \times 10^6$ 次，重复运行频率为 0.1 Hz；建设 4 路驱动器原型演示装置，为建设下一代聚变能源用大电流长寿命重频驱动器储备技术。3) 深度次临界能源包层。形成包层能量放大倍数 > 10 、氚增殖比 > 1.15 的设计方案，开展缩比换料机构、裂变燃料“干法”循环等的演示验证。

2、工程演示阶段（2031—2040 年）

2035 年建成 1000 兆瓦级热功率的池式综合试验堆，采取逐级推进的方式，分步实现集成演示混合堆各项关键技术的演示目标。1) 建设 60 MA 级长寿命重频驱动器。通过逐步调试，实现驱动器重复运行频率为 0.1 Hz、运行次数 $> 1 \times 10^6$ 次/a。2) 演示重复频率聚变放能。聚变单发放能为 1 GJ， Q_{Sci} 约为 20~30，中子源强约为 10^{19} n/s ，验证换靶和余氚回收等技术。3) 在池式综合试验堆上，验证氚自持、包层能量放大功能（能量放大倍数约为 10），考核易裂变燃料增殖、超铀元素嬗变功能；开展聚变堆材料辐照试验、医用同位素生产、区域供热等应用探索，推动聚变能源提前应用，初步演示混合堆的经济性。

3、商业发电推广阶段（2040 年以后）

2035 年开始建设 1000 兆瓦级电功率 Z 箍缩聚变裂变混合堆，2040 年进行发电演示，之后进入商业推广阶段。1) 在工程演示阶段的基础上，进一步提高混合堆性能，驱动器运行次数 $> 3 \times 10^6$ 次/a，聚变单发放能约为 2~3 GJ， Q_{Sci} 约为 20~30，包层能量放大倍数 > 15 。2) 演示聚变堆发电的经济性。3) 建成裂变燃料重整和“简便干法”后处理工厂。4) 逐步推广应用。

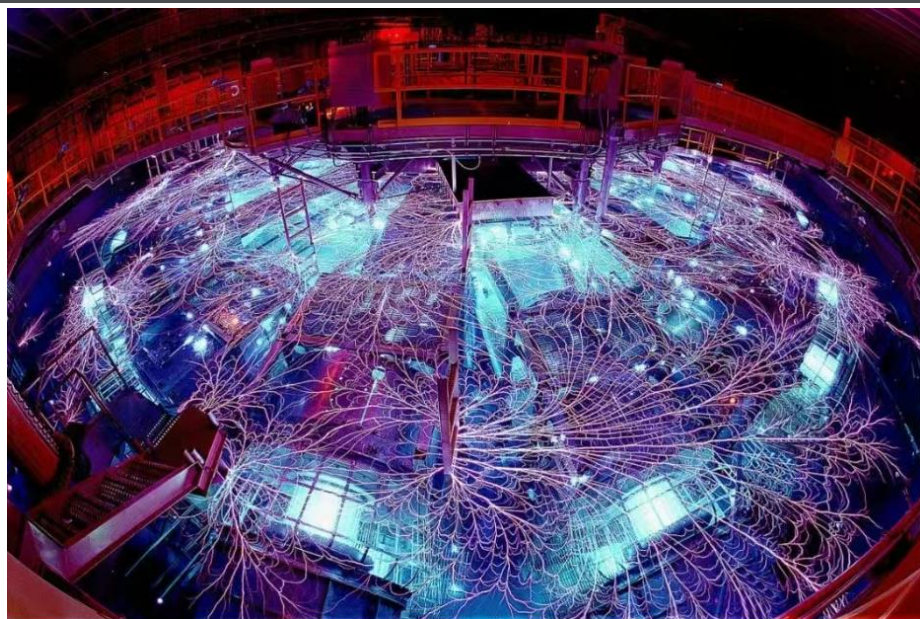
3 全球主要 Z 箍缩路线反应堆介绍

3.1 美国桑迪亚国家实验室的 Z 机器

Z 机器，位于美国桑迪亚国家实验室，是世界上功率最强的 X 射线源。该装置的主要任务是通过模拟核武器爆炸产生的 X 射线，测试核武器系统的可用性，长期以来，Z-机器为实验室的计算机模拟提供关键信息，主要用于测试美国核储备情况。而天体物理学家也会使用 Z-机器打造极端状态，模拟行星内核的极端环境。

桑迪亚国家实验室的 Z 机。由于极高的高压电，供电设备浸没在 2 百万升(2,000m³)变压器油和 2.3 百万升(2,300m³)去离子水的同心室中，作为绝缘体。然而，当机器放电时的电磁脉冲导致令人印象深刻的闪电，被称为“闪络(flashover)”，其可以在房间中的许多金属物体周围被看到。

图13：美国桑迪亚国家实验室的 Z 机器



资料来源：高端装备产业研究中心，民生证券研究院

20 世纪末，Z 机器采用双层丝阵，产生了峰值功率 280TW、总能 1.8MJ 的 X 射线辐射脉冲，这是实验室等离子体中最强的 X 射线辐射源，电能到 X 射线的转换效率高达 15%。2010 年，桑迪亚国家实验室发展了直接驱动的磁化套筒惯性聚变(MagLIF)构型，并在 2014 年的 Z 装置集成实验中，利用 Be 套筒内爆压缩经过预热和磁化的氘氚燃料，获得了 2×10^{12} 个聚变中子。

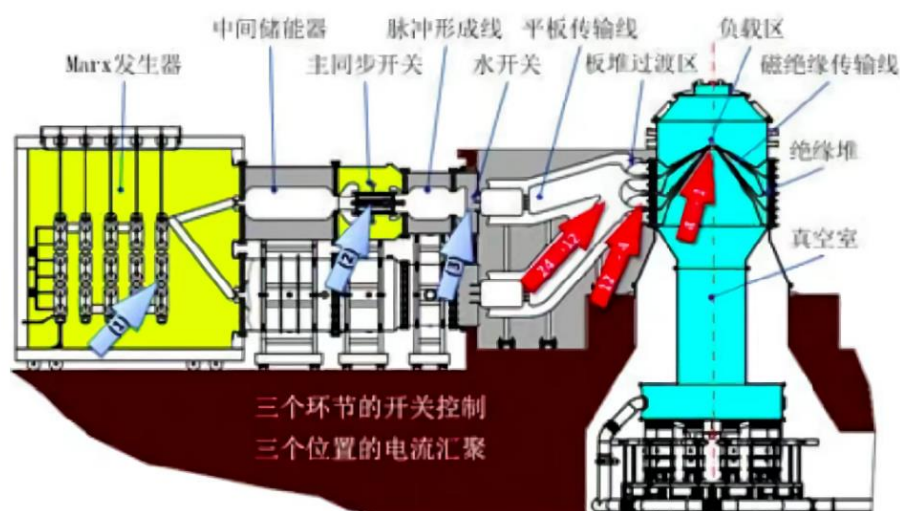
桑迪亚的 Z 机器路线图还包括另一个称为 ZN(Z 中子)的 Z 机器版本，以测试融合动力和自动化系统中的更高能量产额。ZN 计划使用俄罗斯线性变压器驱动器(LTD)替代当前的马克思发电机，每小时提供 20 到 30MJ 的氢融合功率，每小时一次注入。

3.2 中国聚龙一号

中国的“聚龙一号”是由中国工程物理研究院（中物院）主导研发的**超高功率脉冲科学装置**，代表了我国在脉冲功率与高能量密度物理领域的顶尖水平。

聚龙一号是我国重要的 Z 箍缩惯性约束核聚变装置，在闪光 1 号、闪光 2 号等同类装置的基础上研制，采用了“电容储能+基于闭合开关的脉冲形成与压缩+水线传输+真空 MITL(磁绝缘传输线)”的技术路线。采用分立脉冲形成装置产生 24 路、每路太瓦级功率脉冲的设计，采用多个球-板间隙结构自击穿开关实现电流从同轴脉冲形成线到三平板传输线的传输转换，以及两路垂直三平板传输线错时叠加至绝缘堆和真空磁绝缘传输线实现 24 路超高功率脉冲汇流，形成了有特色的聚龙一号总体设计方案。

图14：聚龙一号结构示意图

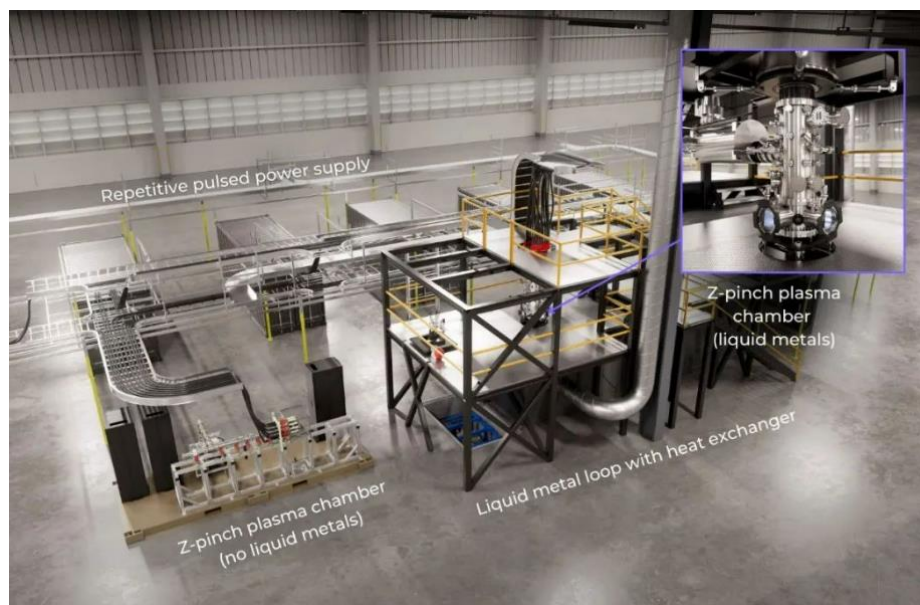


资料来源：高端装备产业研究中心，民生证券研究院

3.3 美国 ZAP Energy 公司

ZAP Energy 成立于 2017 年，部位于美国华盛顿州西雅图市，在埃弗雷特（Everett）和穆尔基特（Mukilteo）设有研究设施。其技术路径基于 Z 箍缩（Z-pinch）核聚变，通过电流产生的磁场压缩等离子体，结合剪切流稳定（Sheared Flow Stabilization）技术克服传统 Z 箍缩的不稳定性问题，目标是开发低成本、模块化的小型聚变反应堆。员工规模超过 150 人。

图15: ZAP Energy 的装置布局图



资料来源：可控核聚变，民生证券研究院

ZAP Energy 现阶段的研究和开发工作都基于三个主要的实验平台上：1) **FuZE：一种紧凑的设备**，利用电流创建和稳定等离子体。目标是证明剪切流稳定 Z 箍缩用于聚变的可行性。自 2018 年以来生成连续的聚变等离子体。2024 年 4 月实现 1–3keV 的等离子体电子温度。2) **FuZE-Q 原型反应堆**：第四代 Z 箍缩装置，设计电流达 650 千安培，目标实现科学盈亏平衡 ($Q=1$)。2022 年 6 月首次成功生成稳定等离子体。3) **Century 测试平台**：2024 年投入运行的集成化演示平台，测试液态金属等关键聚变技术，输入功率达 100 千瓦，验证核电站相关技术的可行性。

ZAP Energy 的 Z 箍缩技术优势与挑战。

技术优势主要集中在以下三方面：1) **无需超导磁体**：不同于托卡马克这类传统聚变装置需要大型、昂贵的超导磁体来约束等离子体。ZAP Energy 的 Z 箍缩使用自生成的磁场，显著降低资本成本并简化反应堆设计。2) **成本优势**：Z 箍缩反应堆尺寸远小于托卡马克或激光系统，这种紧凑性设计的成本比传统路线所需的资金少了几个数量级，这将会在成本上体现巨大优势。3) **高等离子体温度**：2024 年 4 月，ZAP Energy 的 FuZE 设备实现了 1–3keV (1100 万–3700 万°C) 的等离子体电子温度，标志着该设备成为达到此类条件的最简单、最小且成本最低的设备。

ZAP Energy 的方法以其简洁性和潜在的成本节约而脱颖而出，但仍然在电极磨损和等离子体稳定性等方面存在技术挑战。1) **电极耐久性**：高电流可能导致电极熔化或侵蚀，需要坚固的材料或设计。2) **等离子体体积**：Z 箍缩系统中较小

的等离子体体积限制了能量输出，需要更高的电流才能实现商业可行性。3) **规模稳定**：在更高能量水平下维持剪切流稳定是当前研究的重点。

截至 2025 年，ZAP Energy 累计已融资 3.3 亿美元。

图16：ZAP Energy 的 Z 箍缩等离子体腔室



资料来源：可控核聚变，民生证券研究院

3.4 先觉聚能

先觉聚能科技（四川）有限公司，定位为支撑天府创新能源研究院发展的市场化机构，将与天府创新能源研究院共同构建起“研究院+公司”相互支撑的聚变裂变混合能源事业核心组织架构。

天府创新能源研究院：2021 年 2 月在成都设立的一家新型研发机构，以分步实现电磁驱动聚变裂变混合堆能源为目标，致力于聚集领域高端人才，发展创新能源技术，推动高新技术成果转化，支撑成渝综合性科学中心和西部（成都）科学城建设。

3.5 安东聚变

安东聚变（北京）科技有限公司，是“两弹一星”核物理学家彭先觉院士创立的“Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（Z 箍缩）商业发电”核心关键技术产业化公司，公司的目标是把政府、市场、社会的力量有机结合，实现我国自主创新的核聚变尖端技术突破，实现人类能源可持续发展。现阶段公司处于组建 Z 箍缩可控核聚变工程化关键装备及关键技术研发团队，开展 Z 箍缩电磁驱动器科学装置及技术研

发、重频高性能长寿命 LTD 电容开关器件等关键基础技术攻关、完成相关设备与检测仪器开发，示范平台的前期理论及技术工程支撑等技术研究阶段。

2025 年 8 月，安东聚变（北京）科技有限公司完成融资，投资方包含联想之星、道翼资本、水木清华校友种子基金等。

3.6 美国 Pacific Fusion 公司

Pacific Fusion 是一家成立于 2023 年的聚变初创公司，总部位于加利福尼亚州弗里蒙特。

基于劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）和桑迪亚国家实验室（SNL）验证的惯性聚变概念，Pacific Fusion 致力于开发脉冲磁路径来实现惯性聚变。技术上则利用快速上升的大电流脉冲来磁挤压和加热装有氘-氦燃料的小容器，推动燃料达到聚变条件。

公司的近期目标是实现净设施增益，从而为未来清洁能源生产开辟新的可能性。

该司因实力雄厚的创始人团队和 2024 年获得 9 亿融资而备受关注。

3.7 美国 Fuse Energy 公司

Fuse Energy Technologies 专注于磁化套管惯性约束聚变（MagLIF）解决方案的研发。

MagLIF 概念最早由桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratories）的 Slutz 和 Peterson 等于 2010 年前后提出。研究表明，MagLIF 在 Z 脉冲功率装置（Z-machine）上的实验具有可行性，并可能实现聚变点火。

目前，Fuse 在组装全球首个功率最高的驱动器（1TW），并运行一台获得许可的脉冲中子发生器，可产生超过 10^{13} 个热核中子。Fuse 也是美国唯一专注于 MagLIF 的公司。

4 投资建议

Z箍缩装置主要包括60-70 MA级驱动器、次临界能源堆、靶和负载工厂、氚工厂和燃料循环几大系统组成。其中驱动器和靶材为核心子系统，建议关注相关领域布局公司。

4.1 合锻智能

合锻智能始终秉持高端化、智能化的发展战略，以高端成形机床和智能分选设备为主业，为客户提供包括液压机、机械压力机、色选机、聚变堆核心零部件尖端制造、智能化集成控制及新材料等产品和服务。

聚变堆领域，公司主要聚焦核心部件制造，自2021年开始参与聚变堆真空室制造工艺开发及预研工作，在聚变堆核心部件制造领域取得突破性进展。2024年，公司中标聚变新能（安徽）有限公司发包的BEST真空室项目#1-4段，总项目中标金额2.09亿。组织开展50余项涉及真空室成型、加工、焊接、无损、测量等领域试验工作。主要取得的突破性进展有：解决了双曲厚板成型精度控制、反弹量大、成型过程中形变引起相变导致铁素体增加等问题；厚壁奥氏体不锈钢电子束焊接取得突破性进展；开发了粗晶焊缝阵列超声等先进无损检测工艺等。依托聚变堆真空室项目，为满足复杂三维零件下料及坡口加工，引进五轴水刀切割机床；采购国内先进三维扫描仪，进一步提升复杂曲面精度测量能力。结合聚变堆制造需求，拥有一支具备测量、渗透、目视、超声、相控阵超声、泄露检测等专业能力的制造团队。在聚变堆真空室制造项目的基础上，与战略合作伙伴携手共进，加大资源投入，积极解决聚变堆建造的关键技术问题，努力抢占技术高地，当前已组建一支百余人的专项攻坚团队。同时积极推广尖端制造技术应用，为重大工程、重大项目、重大装置的建造提供支持。

4.2 王子新材

王子新材主要涉足塑料包装业务、军工电子业务、薄膜电容业务以及其他业务。公司成立之初主营电子制造业配套包装，服务富士康等国际电子制造业巨头，迅速成为行业领先供应商，随着业务发展，公司逐步拓展至军工电子和薄膜电容领域，并将其作为未来核心发展方向。当前，公司在稳步推进塑料包装业务的同时，重点布局薄膜电容在新能源汽车、光伏、风力发电、可控核聚变及军工等行业的应用，提升军工电子技术研发水平，推动公司向科技化、智能化发展，构建新的发展动能。

王子新材正凭借旗下宁波新容在薄膜电容领域的深厚积累，成为可控核聚变磁体电源系统的重要配套力量。宁波新容为王子新材控股子公司，是国内金属化薄

膜电容领域的老牌企业，产品广泛应用于军工、新能源汽车、光伏、轨道交通等多个高端行业。在可控核聚变方向，公司已参与国内首套核聚变项目，所生产的电容器产品成功应用于磁体电源系统，并已实现首笔订单交付。这意味着王子新材不仅技术路径已被验证，也迈出了进入未来能源核心装备供应链的关键一步。

4.3 国光电气

公司是我国“一五”时期前苏联援建的国家 156 项重点建设项目之一，自成立以来，公司一直从事微波器件的研制生产，至今拥有超过 60 年的研制生产经验。目前，公司已经发展成为国内专业从事真空及微波应用产品研发、生产和销售的高新技术企业。

公司坚持以微波、真空两大技术路径为主线，并结合材料学、光学、自动化、电子学、核物理、低温物理、热力学等科学技术，研发生产出了行波管、磁控管、充气微波开关管、微波固态器件、核工业设备、压力容器真空测控组件等产品，并广泛应用于航空、航天、核工业、新能源等领域。

公司的核工业设备及部件产品主要包括 ITER 配套设备、核工业领域专用泵以及阀门等。

ITER 配套设备：“国际热核聚变实验堆计划（ITER）”是目前全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一。ITER 装置是个能产生大规模核聚变反应的超导托卡马克装置，俗称“人造太阳”，目的是把聚变时放出的巨大能量作为社会生产所需的能源，其原理是对剧烈的聚变核反应加以控制，称为受控核聚变，有望为人类提供取之不尽用之不竭的清洁能源。

公司生产的偏滤器和包层系统是 ITER 项目的关键部件。偏滤器是托卡马克装置的关键组成部分，它是构成高温等离子体与材料直接接触的过渡区域：一面是温度高达几亿度的等离子体，另一面是通常的固体材料。ITER 包层系统的主要功能是吸收来自等离子体和中性束注入的辐射和粒子热通量、为真空室和外部容器组件提供热屏蔽等。包层系统由覆盖约 600 平方米的 440 块包层模块（BM）组成。一块 BM 主要分为两部分：一块面向等离子体的第一壁（FW）面板和一块屏蔽模块（SB）。

（1）偏滤器：等离子体与器壁相互作用是托卡马克研究中最重要的问题之一，其直接影响托卡马克装置的寿命，而偏滤器是等离子体与器壁相互作用的主要区域，也是托卡马克装置的重要组成部分，其主要功能是用来把放电的外壳层内的带电粒子偏滤到一个单独的室内，在此带电粒子轰击挡板，变为中性粒子被抽走，从而避免外壳层内的高能粒子轰击主放电室壁，排来自中心等离子体的粒子流和热流以及核聚变反应过程中所产生的氦灰。

公司研制的偏滤器已应用于 HL-3 等托卡马克装置，HL-3 整个先进偏滤器系统共有 60 个偏滤器模块，由 38 套标准偏滤器模块和 22 套非标准偏滤器模块构成。其生产技术主要基于 HL-3 偏滤器原型件所开发的相关连接、加工工艺以及检测技术，主要包括 CFC/Cu 热沉靶板的加工、支撑架结构生产以及偏滤器模块的装配与检测三部分。

(2) ITER 屏蔽模块热氦检漏设备：ITER 包层屏蔽模块的高温氦检漏是模拟国际热核聚变试验堆运行状态下的密封性检测，主要的功能是对包层屏蔽模块氦气循环的检测，对检测设备的要求非常高。

我国制造的 ITER 包层屏蔽模块全尺寸原型件在所承担的 220 件屏蔽模块中结构最复杂、制造难度最大。公司完成制造调试的真空高温氦检漏设备是全球首台满足 ITER 要求的包层部件的大型真空高温氦检漏设备，该设备采用真空箱法热氦气循环检漏原理，同时具有“真空烘烤”、“去应力热处理”和“热氦气检漏”三大功能。两项重要指标——氦检测仪灵敏度及设备真空室本底漏率在空载状态下均优于 ITER 组织要求，设备的设计、优化、制造、装配、调试，全程实现国产化。

(3) ITER 包层第一壁板 (FW)：第一壁板 (FW) 是 ITER 屏蔽包层的重要组成部分，是 ITER 的核心部件，其直接面向高温等离子体，在 ITER 中起到限制聚变等离子体、屏蔽高热负荷，从而保护外围设备和部件免受热辐射损伤的作用。为满足 ITER 装置使用要求，实现其功能，ITER 第一壁板由三种材料构成，分别为面对等离子体铍更换为钨材料、中间热沉 CuCrZr 合金材料和支撑背板 316L (N) 不锈钢材料，综合考虑了 FW 材料与聚变等离子体的相容性、导热性能和结构强度等。为实现良好的热传导以消耗热负荷，三种材料之间需冶金结合，连接技术成为 ITER 第一壁板制造的核心技术。目前，公司参与新的钨第一壁研制并进入样件生产阶段。

(4) ITER 工艺设备：大规模核聚变反应的超导托卡马克装置是庞大而复杂的装置，涉及大量不同的制造工艺。公司研制出了各种制造及验证装置，包括球床材料测量系统、带高温环境箱的电子万能试验机、多功能快速钎焊炉等工艺设备，用于 ITER 相关的试验、测量及生产工艺之中。

4.4 联创光电

公司主营业务为激光系列及传统 LED 芯片产品、智能控制系列产品、背光源及应用产品、光电通信与智能装备线缆及金属材料产品的研发、生产和销售。具体如下：

1、激光系列及传统 LED 芯片产品主要为特殊领域高功率高亮度泵浦源器件、激光器集成产品、发光芯片、特种红外不可见光芯片以及激光反制无人机产品等产业链上中下游产品，广泛应用于国内特殊领域及遥控、指示灯等领域；

2、智能控制及应用产品主要应用于家用电器、健康器具、卫浴洁具、新能源汽车、光伏、储能和工业控制等领域；

3、背光源及应用产品主要应用于平板、工控、车载、电脑、手机等背光源显示领域；

4、光电通信与智能装备线缆及金属材料产品主要应用于通信产品及相关设备、计算机网络、特殊用途等领域。

在可控核聚变方面，公司主要聚焦超导产业，联创超导重点聚焦于技术研发与产业化建设。第一，创建了南昌市高温超导应用技术重点实验室。第二，完成了光伏级高温超导磁控单晶生长设备样机的生产及客户现场安装调试。第三，实现光伏级磁控单晶生长设备的产业化，已获取批量化订单，进入商业化加速发展阶段。第四，成功将高温超导集束缆线技术应用于可控核聚变领域的高场磁体研制，自主设计的 D 型超导磁体成功制备并通过低温测试。

同时，2023 年 11 月，公司与中核聚变（成都）设计研究院有限公司计划各自发挥技术优势，采用聚变裂变混合路线，拟在江西省联合建设可控核聚变项目，技术目标 $Q > 30$ ，实现连续发电功率 100MW，工程总投资预计超过 200 亿元人民币。2024 年 6 月，联创光电与中核集团就共同推进“星火一号”聚变-裂变混合示范堆的建设达成了初步合作意向。

4.5 爱科赛博

公司主营业务为电力电子变换和控制设备的研发、生产和销售，主要产品为精密测试电源、特种电源和电能质量控制设备。

在核聚变领域，公司前期参与过 EAST 全超导磁体托卡马克核聚变反应试验性装置，涉及动态电源；分别于 2016 年、2023 年参与 DIII-D 国家聚变设施项目，涉及控制电源；于 2019 年参与中国环流三号项目，参与 HL-2M 托卡马克真空室线圈电源等。同时，为响应可控核聚变领域对适配电源的专项需求，公司已正式组建可控核聚变电源研发团队，并完成研发立项工作。本次团队组建与立项的核心目的，并非开展可控核聚变电源的全新从零研发，而是基于公司现有平台成熟产品，实现定制化需求与快速交付的平衡，其一，复用成熟核心模块，保障产品基础性能；其二，聚焦定制化适配开发，满足专项需求；其三，保障小批量快速交付，响应项目时效要求。

4.6 英杰电气

英杰电气作为国内综合性工业电源研发与制造领域具备较强技术实力及市场竞争力的企业，始终专注于电力电子技术在工业各领域的深度应用，主要从事以功率控制电源、特种电源为核心的工业电源设备的研发、生产及销售业务，同时涵盖新能源汽车充电桩/站、储能产品的研发、生产与销售业务。

英杰电气与多家顶尖科研机构保持深度协同，技术成果转化成效显著。**可控核聚变研究方面**，依托多年积累的大功率电源研发经验，英杰电气凭借在高电压调控、大电流输出及抗干扰设计等核心技术领域的显著优势，为相关科研项目提供了关键电源设备支撑。2024 年，公司核聚变相关电源订单已突破千万元；。

公司在可控核聚变电源领域具备深厚的技术积淀与市场经验，长期为客户提供涵盖回旋管电源、中性束电源等在内的辅助加热电源产品。近年来，公司紧跟技术迭代趋势，拓展了基于 IGBT 技术的磁场电源等新型产品序列。此外，公司产品体系还包括真空室烘烤电源、等离子体清洗电源、冷却系统电源等，全面覆盖磁场约束、等离子加热、控制系统、辅助系统等核聚变关键环节。在客户合作层面，公司与西南物理研究所（585 所）、中科院合肥等离子体所等国内顶尖科研院所建立了稳固的长期合作机制。2024 年，公司核聚变相关电源订单突破千万元，历史累计订单已达数千万元。2025 年上半年，该行业迎来新的发展契机，公司持续发力，正积极对接国内多个在建核聚变工程项目，力争实现该领域业绩的跨越式增长。在定制化服务方面，公司针对科研装置的特殊需求提供专属解决方案。例如，为中国科学院高能物理研究所定制的直线加速器聚焦电源，不仅满足了设备对电源精度、稳定性及抗干扰能力的严苛指标要求，更通过全周期技术保障，为科研实验的顺利推进筑牢了硬件基础。目前，公司正积极与国内重点商业核聚变项目进行对接，努力扩大市场覆盖范围。

5 风险提示

1) 可控核聚变技术突破不及预期。建造可控核聚变发电厂任务艰巨，而且目前技术还不够成熟，只是向商业化运用迈进一步，未来是否能够继续技术突破还未可知。

2) 下游需求波动风险。目前产业还处于孵化阶段，对于下游的应用场景仍存在不确定性。

3) 国内外政策推动不及预期。核聚变各方面的政策尚不清晰，目前需要政策端的推进，若政策落地力度不及预期，可能对行业需求造成影响。

插图目录

图 1: 全球聚变行业融资额大幅增加.....	5
图 2: 聚变领域投资者呈现多元化特征.....	6
图 3: 磁约束技术为主流技术路线.....	7
图 4: 氘氚为主流燃料组合	7
图 5: 2030 年是行业公认的实现商业化时期.....	7
图 6: 聚变能目标市场聚焦于发电、离网能源、工业用热三大领域.....	8
图 7: 聚变人才队伍持续扩大	8
图 8: 惯性约束路线奋起直追	10
图 9: Z 箍缩概念示意图	13
图 10: Z 箍缩带阵负载概念设计示意图.....	14
图 11: Z 箍缩次临界堆模块结构示意图.....	15
图 12: Z 箍缩建造成本估算与经济评估	16
图 13: 美国桑迪亚国家实验室的 Z 机器.....	18
图 14: 聚龙一号结构示意图.....	19
图 15: ZAP Energy 的装置布局图	20
图 16: ZAP Energy 的 Z 箍缩等离子体腔室	21

表格目录

表 1: 中国聚变政策支持要点	4
表 2: 各国聚变支持政策要点	5
表 3: 部分重点企业产业融资案例	6

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑获取本报告的机构及个人的具体投资目的、财务状况、特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，进行独立评估，并应同时考量自身的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代自身的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市虹口区杨树浦路 188 号星立方大厦 7 层； 200082

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：深圳市福田区中心四路 1 号嘉里建设广场 1 座 10 层 01 室； 518048