

证券研究报告 | 机械设备 | 2025年07月30日

机械团队·行业深度报告

可控核聚变关键技术路径——仿星器：适合稳定长时间运行的磁约束装置

分析师

李鲁靖

登记编号：S1220523090002

赵璐

登记编号：S1220524010001

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

仿星器：作为托卡马克的兄弟路线，因其极为复杂的结构设计和磁体设计，此前很长一段时间发展进程落后于托卡马克。而随着**高性能计算、先进模拟技术、数字孪生、人工智能、增材制造**等新技术的愈发成熟以及在仿星器设计方面的应用深入，仿星器发展显著加速。

相比托卡马克的极向场通过真空室内等离子电流自身产生磁场（电流难维持，并需要外界一直注入粒子、注入波），而仿星器中的**磁场全部由外部线圈产生，由于没有驱动等离子电流的外部设计，因而不存在托卡马克中等离子的破裂现象，对于维持环向等离子体的连续性稳定性更容易**，因此仿星器从开机开始，等离子就是稳定的。这也使得仿星器更适合长时间、稳定供应电流，用于发电。

成本构成：仿星器作为托卡马克的兄弟技术路线，二者建造成本基本相当。仿星器的包层模块、磁体分别为10%、29%，高于二者在托卡马克中8%、25%的占比。

此外，近年来，高温超导材料产能逐渐扩大，价格也所有下降，但**高温超导基于其陶瓷性能，应力达到20T后容易失超**（即超导体因某种原因突然失去超导特性而进入正常态的过程）。对托卡马克而言，磁场要变化，感应出等离子体电流，变化过程中产生交流损耗，很容易失超。而仿星器没有这个问题，磁场是稳态的，此外，随着磁场强度提高，装置体积也会大幅缩小，从而降低建造成本，因此，**高温超导天然适合仿星器**。因此，未来仿星器的降本，也在一定程度上取决于超导磁体的技术成熟度和价格变化。

分类：按照线圈结构不同，仿星器可以划分为“8”字形仿星器、跑道形仿星器、扭曲器、螺旋器、螺旋轴仿星器、螺旋先进仿星器等。目前典型的仿星器装置包括，螺旋器代表**日本大型螺旋装置（LHD）**、螺旋轴仿星器代表**H-1**、西班牙**TJ-II**、螺旋先进仿星器代表**—准等磁力线德国Wendelstein 7-X**、准螺旋对称代表**威斯康星大学HSX**等。

投资建议：仿星器与托卡马克装置的成本构成基本相当，但其中，包层模块、磁体占比有所提升，建议关注

- 1) **超导磁材/磁体**：永鼎股份、联创光电、精达股份、东方钨业、西部超导。
- 2) **堆内构件**：合锻智能、国光电气、安泰科技、派克新材、上海电气、海陆重工、江苏神通、斯瑞新材；
- 3) **电源**：旭光电子、王子新材、四创电子、英杰电气、爱科赛博、新风光。
- 4) **燃料、检测、辅助系统**：国光电气、景业智能
- 5) **3D打印**：铂力特、南风股份；
- 6) **核心模块建设及分系统制造**：利柏特、中国能建

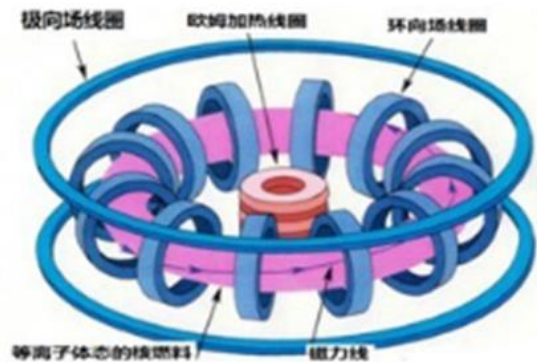
风险提示：核聚变技术研发不及预期风险、投资不及预期风险、交付节奏不及预期风险、原材料价格波动风险

1. 仿星器的原理及其与托卡马克对比

• 1.1 仿星器的原理

- 仿星器与托卡马克：长期以来，仿星器因其极为复杂的结构设计和磁体设计，发展进程落后于托卡马克。而随着高性能计算、先进模拟技术、数字孪生、人工智能、增材制造等新技术的愈发成熟以及在仿星器设计方面的应用深入，仿星器发展显著加速。
- 共同点：**两者都通过创建一个环形几何结构、形成带有封闭磁场的系统，限制等离子体的运动范围，使等离子体沿着这些场线无休止地循环。
- 不同点：**托卡马克的极向场通过真空室内等离子体电流自身产生磁场（电流难维持，并需要外界一直注入粒子、注入波），而仿星器通过磁场的三维结构，把原来需要电流的部分抵消掉。等离子体运动过程中，部分发生漂移和逃逸，等离子体不同方向漂移还会导致电荷分离，并产生电场、阻止等离子体正常运动。为解决这一问题，研究人员通过改变磁场的几何结构，将磁场线沿环面向极方向扭曲，形成磁面，即“场线旋转变换”，从而等离子体的运动限制在磁面内。产生场线旋转变换的方法是托卡马克和仿星器设计的主要区别。

托卡马克示意图

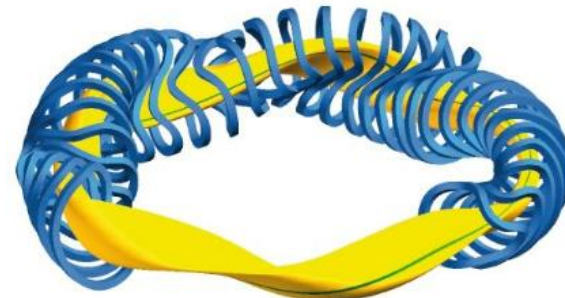


磁场线旋转变换是通过使环面环绕变压器的一侧而产生。

优势：几何结构简单，磁场的幅值和矢量都是环面对称的（对称性）

劣势：面临感应电流饱和，和对大电流的需求限制了其长期运行的可行性等问题，当前研究人员利用其他辅助加热和电流驱动的方法，如射频加热和中性束注入（NBI）等，克服其局限性。

仿星器示意图



磁线圈（蓝色）、
等离子体（黄色）、
等离子体表面磁场线
（绿色）

通过一系列扭曲的线圈产生场线，避免感应电流饱和问题。

优势：实现了更加稳定的长期运行

劣势：设计缺乏环形对称性，无法确保磁性表面的嵌套性，从而导致粒子逃逸和能量损失。

近年来，随着准对称性理论的完善与数值工具的探索发展，研究人员准对称仿星器设计方面已取得一定成果，能够生成高精度准对称位型，粒子约束性能不弱于全球最大托卡马克装置——国际热核聚变实验堆（ITER）。

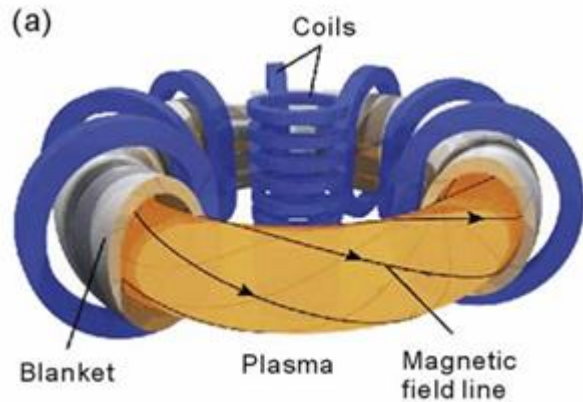
1.2.1 仿星器 vs 托卡马克：等离子体稳定性

背景：托卡马克的极向场通过真空室内**等离子电流**自身产生磁场（大电流难维持，并需要外界一直注入粒子、注入波），而仿星器通过磁场的三维结构，把原来需要电流的部分抵消掉了。

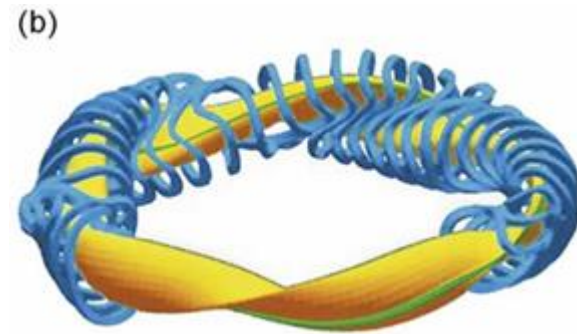
【**等离子体破裂**】是指托卡马克或其他磁约束装置中的**高温等离子体突然失去约束，导致等离子体电流和能量在毫秒级时间内崩溃的现象**。等离子能源失去约束，会在ms时间内冷却到1keV以下，进而被腔壁材料和腐蚀污染，导致等离子电阻显著增加和极快的电流淬灭，进而导致真空室、堆内构件产生电磁负载，并使这些原件产生巨大的机械负载。无论是常规还是先进托卡马克，由于存在各种磁流体力学（MHD）不稳定性，等离子破裂现象严重而频繁。

仿星器中的**磁场全部由外部线圈产生**。由于没有驱动等离子电流的外部设计，因而不存在等离子体的破裂，对于维持环向等离子体的连续性稳定性更容易，因此仿星器从开机开始，等离子就是稳定的。

托卡马克示意图



仿星器示意图



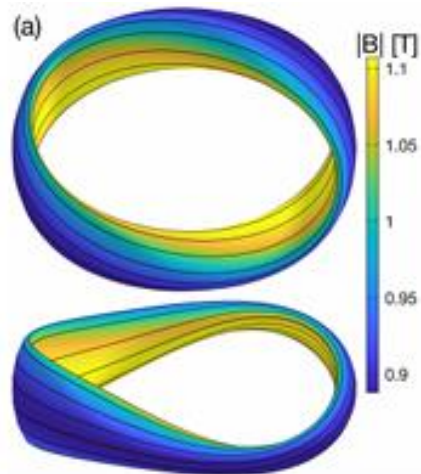
1.2.2 仿星器 vs 托卡马克：新经典输运问题

背景：长期以来，仿星器并没有作为聚变堆技术路线的首选，主要原因有两个：一是传统仿星器磁场的波纹度比托卡马克大，导致其新经典输运水平和高能粒子损失水平高于托卡马克。二是仿星器需要三维结构的线圈，结构复杂，制造难度大、成本高。

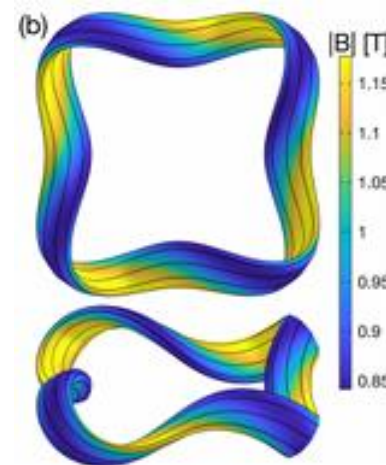
【新经典输运】在环形装置中，环面内侧的磁场比外侧的强，磁场的曲率和梯度会导致等离子体漂移，输运系数比经典输运系数高好几倍，这种碰撞输运被称为新经典输运。根据碰撞频率的大小，新经典输运一般可以划分为3个区：香蕉区，平台区，碰撞区。

传统仿星器磁场的波纹度比托卡马克大，导致其新经典输运水平和高能粒子损失水平高于托卡马克。最近的研究出现了重要突破，发现**可通过磁场位形优化实现精确准对称，证明了仿星器可以实现和托卡马克相当的新经典输运水平和高能粒子损失水平。**这一突破很有可能推动仿星器发展走上一个新的台阶。国际上尚无采用精确准对称位型的仿星器装置来验证这一科学发现，这为我国仿星器研究提供了一个重要发展机遇。

准轴对称



准螺旋对称



1.2.3 仿星器 & 托卡马克：磁体结构

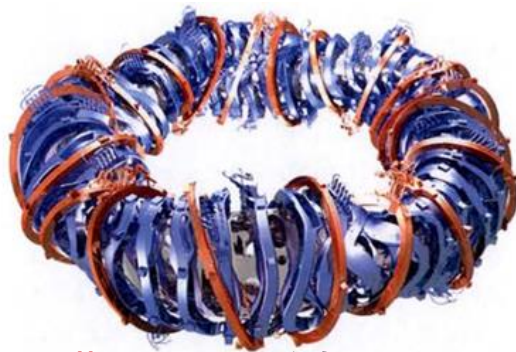
背景：长期以来，仿星器并没有作为聚变堆技术路线的首选，主要原因有两个：一是传统仿星器磁场的波纹度比托卡马克大，导致其新经典输运水平和高能粒子损失水平高于托卡马克。二是仿星器需要三维结构的线圈，结构复杂，制造难度大、成本高。

【磁体结构简化】W7-X的超导线圈系统包括**50个模块化线圈**和**20个平面线圈**，**模块化线圈**提供了约束等离子体的主要磁场（**装置由5段完全一样的模块组成**），而平面线圈主要用于调整等离子体位型。所有的超导线圈都由**NbTi**导体材料制成，运行在4K温度。磁场强度3T，这种模块化线圈结构设计使得等离子体可以实现稳态运行。

此外，科研人员还发现，可以**引入永磁体**来简化仿星器的线圈。引入永磁体后，**仿星器可采用和托卡马克一样的平面线圈**，从而极大降低建造的**难度和成本**。由于主要的环向磁场还是由线圈来产生，永磁体仅仅用来补偿等离子体表面的法向磁场，产生旋转变换，因此并不需要永磁体产生很强的磁场。而且，永磁体不耗能、成本低、天然稳态，且采用永磁体的仿星器产生的磁场位型，其精度远高于仅采用线圈的仿星器。这为建造精确准对称的低成本先进仿星器实验装置，提供了一个难得的时机。

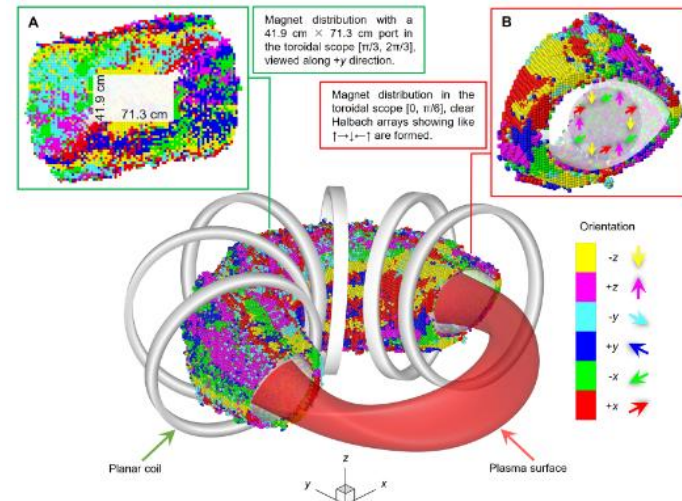
相比于当前仿星器采用的极为复杂的三维扭曲线圈，可批量制造的标准化磁体块以及简单线圈的低生产成本和低工程难度对仿星器的设计，建造，维护具有十分重要且深远的意义。将永磁体和准对称位形结合起来的先进仿星器，很有可能成为极具竞争力的低成本稳态磁约束聚变实验装置。这也是我国提升仿星器研究水平的重要契机。

W7-X仿星器超导线圈示意图



蓝色的为**非平面的模块化线圈(50个)**，红色的为**平面化线圈(20个)**。这些线圈分布在完全一致的五个周期上，每个周期内的两个半周期又符合仿星器对称性(镜像对称)。因此，总共有5个独特形状的模块化线圈和2个独特形状的平面化线圈。

采用标准化永磁体和平面线圈的准轴对称仿星器



1.2.4 仿星器 & 托卡马克：成本构成

【仿星器的成本构成】：根据IPP数据，螺旋先进仿星器（Helias）的成本构成大致与托卡马克相似，但不同的是，**仿星器的包层模块、磁体分别为10%、29%，高于二者在托卡马克中8%、25%的占比**，而其余设备占比相对减少。此外，由于仿星器具有稳态磁场，系统的再循环功率预计也会降低。

从绝对投资额来看，据IPP数据，从1995年到2021年12月达到最终配置，W7-X投资成本达到4.6亿欧元，如果考虑研究院所在地的成本（建筑、人员、材料、运营成本），总投资额约为14.4亿欧元。

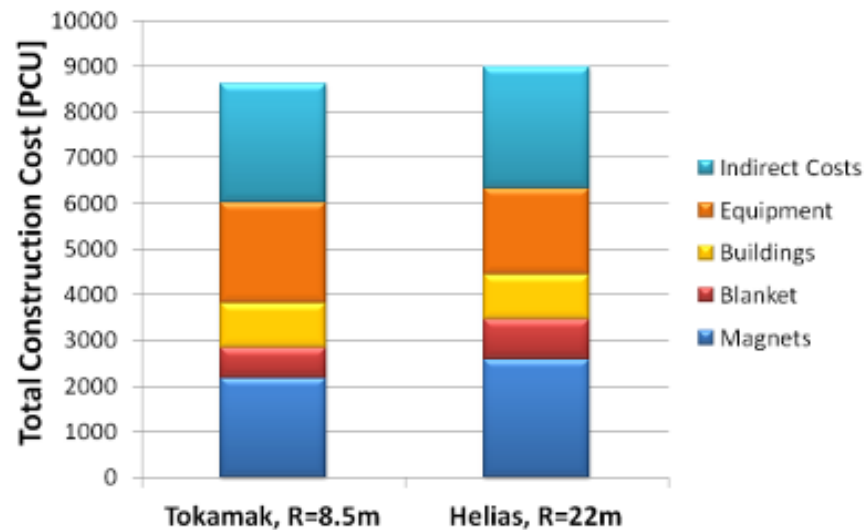
总体上看，**仿星器作为托卡马克的兄弟技术路线，二者建造成本基本相当。**

此外，近年来，高温超导材料产能逐渐扩大，价格也有所下降，但**高温超导基于其陶瓷性能，应力达到20T后容易失超**（即超导体因某种原因突然失去超导特性而进入正常态的过程）。对托卡马克而言，磁场要变化，感应出等离子体电流，变化过程中产生交流损耗，很容易失超。而**仿星器没有这个问题，磁场是稳态的**，此外，随着磁场强度提高，装置体积也会大幅缩小，从而降低建造成本，因此，**高温超导天然适合仿星器。未来仿星器的降本，一定程度上取决于超导磁体的技术成熟度和价格变化。**

托卡马克与仿星器成本拆分

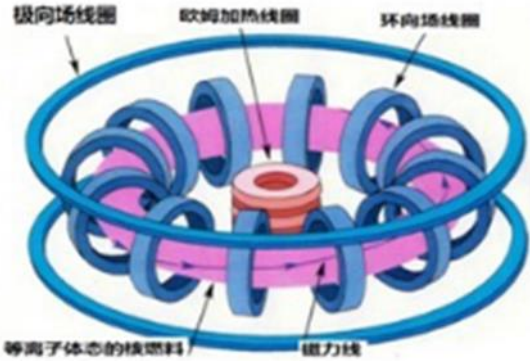
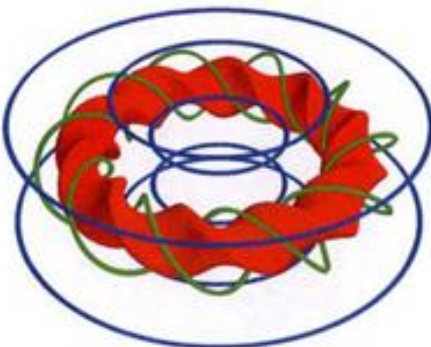
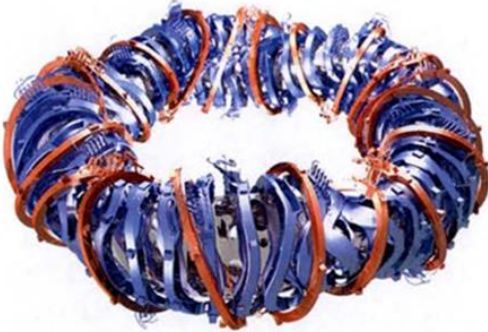
部件	托卡马克	螺旋先进仿星器 (Helias)
设备	26%	21%
建筑	11%	11%
磁体	25%	29%
包层模块	8%	10%
间接费用	30%	30%
Cold Mass	40kt	44kt
SC Mass	1.8kt	~2.9kt

托卡马克与仿星器建设成本



注：装置建造成本不能单纯以半径衡量，托卡马克中间有中心螺线管，Helias中间为空心。

1.2.5 仿星器 & 托卡马克

托卡马克	传统仿星器	先进仿星器
		
极向场依靠环向等离子体电流	极向场依靠外部三位线圈产生	采用优化磁场位形、模块化线圈
需要驱动电流	无需驱动电流	无需驱动电流
等离子体破裂风险大	等离子体稳态运行	等离子体稳态运行
新经典输运低	新经典输运高	可降低至与托卡马克相当
粒子约束能力强	粒子约束能力差	可提高至与托卡马克相当
磁体结构简单	磁体结构复杂	模块化线圈简化磁体结构

2. 仿星器的发展历程及分类

2.1 仿星器的发展历程

- 仿星器的发展历程：
- 【阶段一：1950年代达到小高潮后，1960年代受限于成本、加工难度逐渐淡出舞台】
- 仿星器诞生于上世纪50年代，发展于上世纪80年代。仿星器的概念是美国天体物理学家斯必泽提出。1951年，他提出通过类似8字形的螺线管产生有别于传统环形磁场的磁力线，通过在8字弯曲处实现等离子向上、向下漂移的抵消，达到等离子体的约束目的。1953年第一个8字型仿星器Model-A诞生，而后立刻被证实相对于传统的环形约束，8字形装置在等离子体约束性能上有更好的效果。
- 随后，美国Model-B系列(B1, B2, B3)，日本Heliontron(1959)，德国Wendelstein-A(1960)等仿星器先后诞生，达到仿星器研究的第一个小高潮。1971年，国内也组装了“凌云”仿星器。但当时由于国内在理论模拟上，受限于仿星器复杂的磁场结构，没有与之匹配的计算能力，加之仿星器线圈的加工过于精密，当时工业制造能力匮乏，“凌云”仿星器停止了调试。
- 在当时，仿星器相比托卡马克而言，无论在建造、设计、维护、运行成本均大于托卡马克。尤其是当时所产生的实验参数始终低于同一时期的托卡马克。1968年苏联T3托卡马克成功实现了1KeV电子温度并成功通过了英国科学家验证，美国原本 Model-C 系列仿星器更是直接改造为了托卡马克，冷战两个阵营的领袖国纷纷明确聚变发展方向为托卡马克的同时，仿星器的研究慢慢落入了第一个低谷。

Model-A

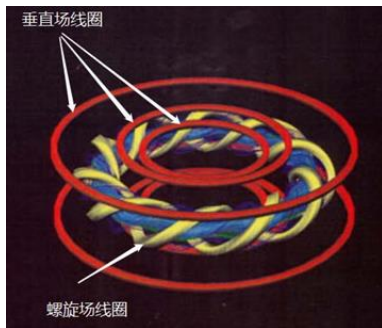


2.1 仿星器的发展历程

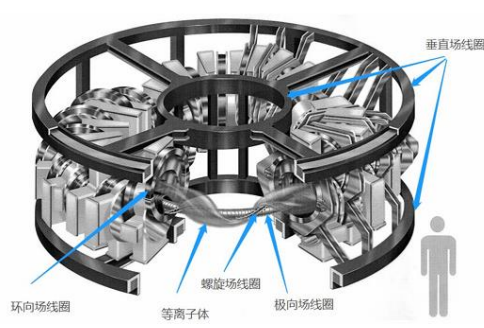
【阶段二：70年代后，螺旋器、扭曲器产生】

- 70年代后，随着仿星器理论发展，及计算机运行能力提高、工业制造能力提升，**螺旋器** (Helical Axis Device)、**扭曲器** (Torsatan) 产生。相较于老式仿星器，螺旋器、扭曲器的新式线圈系统得到了极大简化。
- 扭曲器**：其将原有经典仿星器上的环向场线圈与螺旋场线圈耦合成为新的“螺旋场线圈”，通过上述处理方式直接减少了一类线圈的使用，这极大的简化了线圈的设计成本和实验后的维护成本。
- 螺旋器**：相比较于经典仿星器螺旋器的特点在于，环向场线圈的中心不再排列在同一平面的圆周上，而是排列在一个螺旋线条上，其代表装置为澳大利亚的H-1 仿星器和西班牙的TJ-II仿星器。螺旋器中的代表即为日本国家核融合科学研究所 1998 年开始运行的大螺旋装置 (LHD, large Helical Device)。LHD 作为一个稳态超导线圈的仿星器其大半径为3.75m小半径为0.6m，共可产生3T磁场。

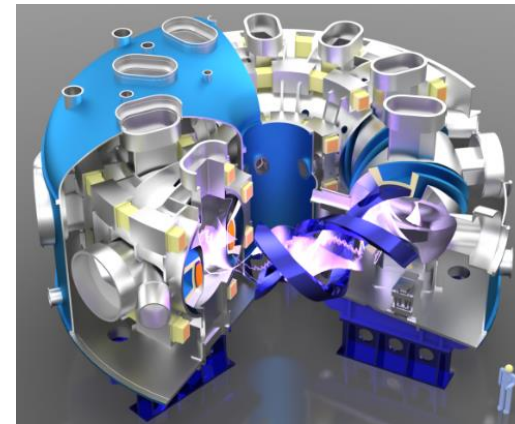
LHD线圈结构图



TJ-II线圈空间结构



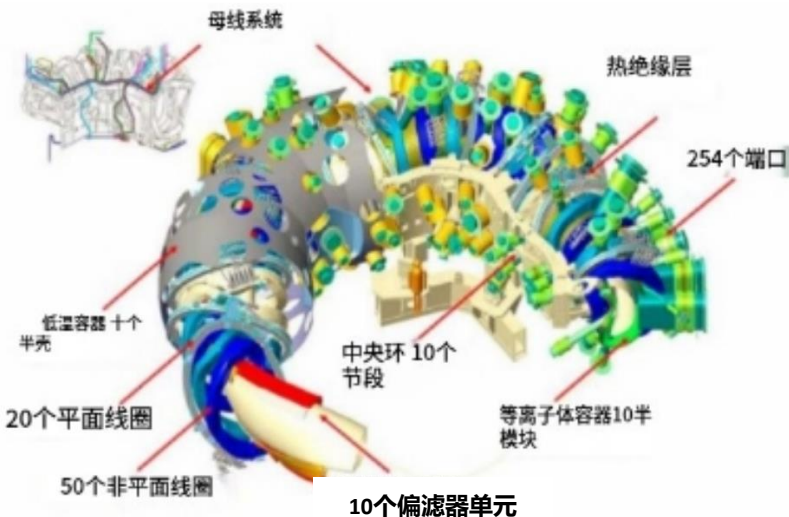
日本大螺旋装置 (LHD)



2.1 仿星器的发展历程

- 【阶段三：德国仿星器W7-X的诞生】**
- 与此同时，以德国为代表多国并未放弃对仿星器的研究，在之前的研究基础上**W7-A**于1980年成功达到1KeV的离子温度的佳绩。在W7-A成果的基础上，马克普朗克物理研究所于1982年开始着手**W7-AS**的建造，并经过30年的持续研究与优化，现阶段**全球最大仿星器W7-X于2015年成功放电**。它的大半径R=5.9m，小半径 r=0.53m，等离子体总体积是30m3。
- 与一般的托卡马克装置和螺旋器相比，W7-X 的线圈基本结构与组件非常复杂，其线圈系统由50个模块化线圈和20个平面线圈总计70个线圈组成，作为当代制造业结晶之一，其**线圈制造误差控制在1mm以内，线圈最大安装误差小于4.4mm**，产生了最终磁场精度与设计误差达到十万分之一的最终结果。
- 由于**扭曲器、螺旋器、模块化仿星器**都没有环向等离子体电流的特点，所以都归类统称为仿星器。目前，德国的W7-X、日本的LHD装置是世界上最大的两个仿星器，其他各种大小的仿星器分布在世界各地。

W7-X基本组件示意图



全球主要仿星器参数

装置名称	类型	国家	大半径 (m)	小半径 (m)	磁场强度 (T)
W7-X	螺旋器、模块化	德国	5.9	0.53	2.5
LHD	螺旋器	日本	3.9	0.5-0.65	3.0-4.0
NCXS	模块化	美国	1.4	0.31	1.2-1.7
H-1NF	螺旋器	澳大利亚	1.2	0.2	1
TJ-II	螺旋器	西班牙	1.5	0.22	1

2.1 仿星器的发展历程

2016年12月南华大学通过了“引进H-1仿星器的调研报告”，2017年4月与澳大利亚国立大学签署了两校科技交流合作谅解备忘录，正式开始实施“引进澳大利亚国立大学H-1仿星器装置”项目。该项目拟定通过直接引进H-1仿星器装置进而直接填补国内初代仿星器装置的空白。

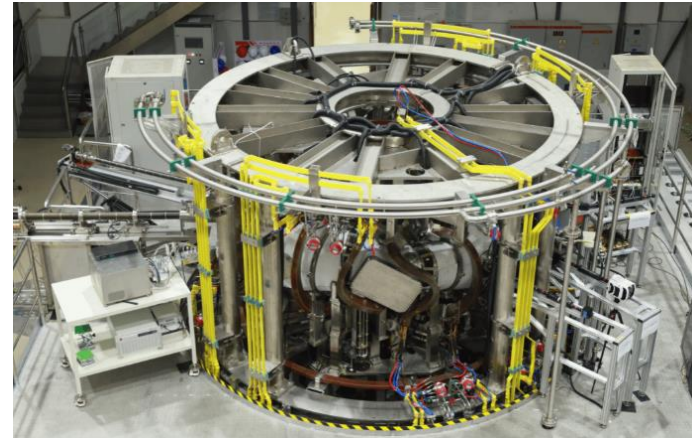
南华大学与澳洲国立大学签署备忘录



西南交通大学也开始与日本国家核融合科学研究所合作，双方共同签署了中国第一台准环对称仿星器项目（CFQS, Chinese First Quasi-axisymmetric Stellarator）。2020年，作为中国缔约方，西南交通大学加入国际能源署仿星器技术合作组织。2024年，CFQS在国际上首次利用三维模块化线圈获得超高精度的“准环向对称磁场位形”，使我国成为继美国和德国之后又一掌握“三维非平面模块化线圈”高精度制造工艺的国家。

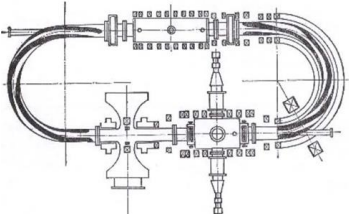
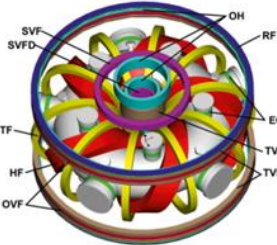
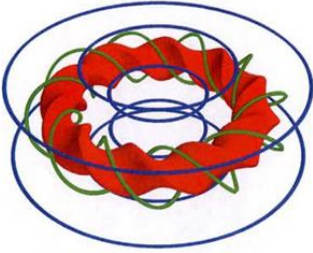
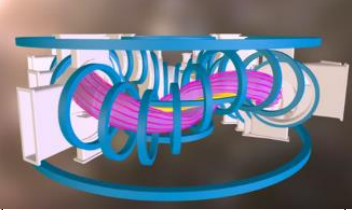
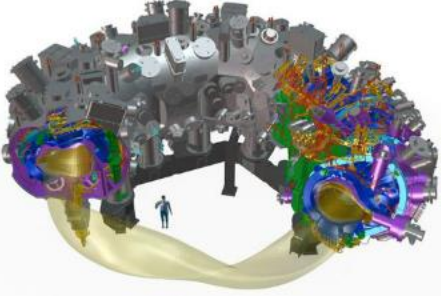
中国首台准环对称仿星器研究得到四川省、成都市、天府新区的大力支持，已成为立项建设的四川省重大科技基础设施，**现已进入建设阶段，并有望在2027年实现装置运行。**

中国首台准环对称仿星器CFQS



2.2 仿星器的分类

按照线圈结构不同，仿星器可以划分为“8”字形仿星器、跑道形仿星器、扭曲器、螺旋器、螺旋轴仿星器、螺旋先进仿星器等。

	" 8 "字形仿星器 (Figure-8)	跑道形 (Racetrack-shaped) 仿星器	扭曲器 (Torsatron)	螺旋器 (Heliotron)	螺旋轴仿星器 (Heliac)	螺旋先进仿星器 (Helias)
特征	依靠 扭曲线圈空间排布的轴 线 来实现内部磁力线的旋转变换	通过在 跑道环处安装不连续的螺旋绕组线圈 来扭曲磁面产生旋转变换	由 连续螺旋绕线圈 缠绕而成	在扭曲器的基础上 增加极向场线圈提供垂直场 ，也可以加入 环向场 线圈来调节磁面的波纹度	其 磁轴为扭曲的螺旋线 ，通常 旋转变换要高于扭曲器和螺旋器	采用 模块化线圈 产生优化过的磁面位型，可以满足 高比压、低自举电流、对高能量α粒子的约束时间长 等要求，是目前最有可能实现仿星器聚变的一种设计思路。
代表装置	美国Model-A	Model-C和中国“凌云”	Compact Toroidal Hybrid (CTH)	日本LHD、德国W7-A	西班牙TJ-II	德国Wendelstein7-X
图片		 凌云仿星器结构图^[13]。该跑道形装置的主磁场由三个螺旋绕组（1-3）组成，上侧中间位置为等离子体回旋加热装置，下侧左边为偏滤器，右边为注入室。				

3. 仿星器的构成及全球主流仿星器路线

3.1 仿星器的构成：磁面、磁轴、磁岛、磁井

仿星器环向和极向这两部分磁场完全由外部线圈供电提供。在磁约束核聚变装置中，等离子体中带电粒子的运动表现为绕磁力线的螺旋运动和偏离磁力线的漂移运动。为了克服因漂移所产生的粒子损失，等离子体内的磁力线务必被构造成为一种螺旋磁力线形式，这使得带电粒子绕磁力线运动过程中，时而在等离子体内侧，时而在等离子体外侧。这样，沿着环向螺旋前进的磁力线绕过无穷多圈（有理面除外）后就形成了磁面。如果追踪仿星器等离子体中的每条磁力线，选定某个环向角的极向截面，得到一系列磁力线与该极向截面的焦点，可得到磁场在极向截面上的庞加莱图。庞加莱图中一圈圈由离散点组成的闭环，反映出等离子体中的磁面形态，其中，中心的一点即为**磁轴**。

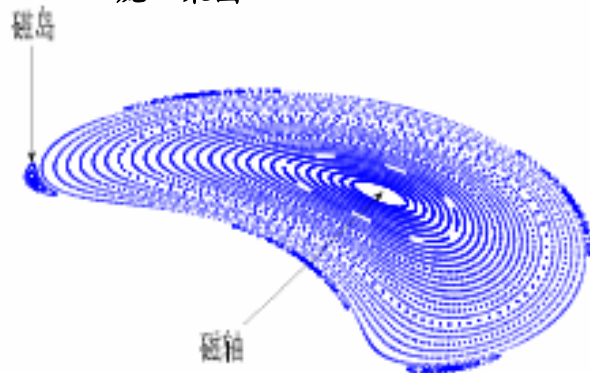
磁岛：是指在非理想等离子体中，靠得较近的平行反向磁场间可能存在闭合磁力线结构。作为磁约束装置中的一种拓扑不稳定性，其主要出现的位置位于有理面附近。磁岛可通过多种磁扰动或磁流体不稳定性产生，最知名的莫过于由于撕裂膜导致的磁重联所产生的磁岛，其后果是撕裂膜磁岛提升了径向等离子体输运导致大破裂。在2025年完工的ITER项目中新经典撕裂膜也是最危险的磁流体现象之一。

通过螺旋的磁力线产生旋转变换保障了等离子体中的带电粒子在有效的约束时间内按既定的路线绕磁力线进行螺旋运动，为了衡量仿星器中磁力线的扭曲程度，我们常用在托卡马克中用到的安全因子的倒数来表示旋转变换，旋转变换范围越大，磁场位形越丰富。**磁剪切**是衡量旋转变换在径向上变化幅度的参数，具体可通过旋转变换在径向上的变化斜率来反映

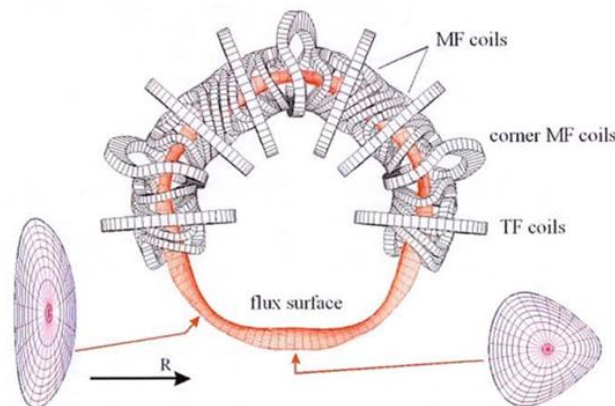
磁井：是影响等离子体稳定性的另一个参数。其数值常用等离子体的比容(U)来表示，其值为对应**磁面对应体积(V)**与所在**磁面的环向磁通**的比值。

磁井最大深度一般为磁轴和等离子体边界处的等离子体比容的差值，与磁轴处的等离子体比容之比值，反应了等离子体比容变化量相较于磁轴处等离子体体积的比值大小。在通常表述中，常将磁井相对深度简称为**磁井**。一般磁井值越大越好。

仿星器中磁极在极向截面上的
庞加莱图



W7-AS仿星器等离子体**磁面形状**和外部模块化线圈
(MF coils)与纵场线圈 (TF coils)



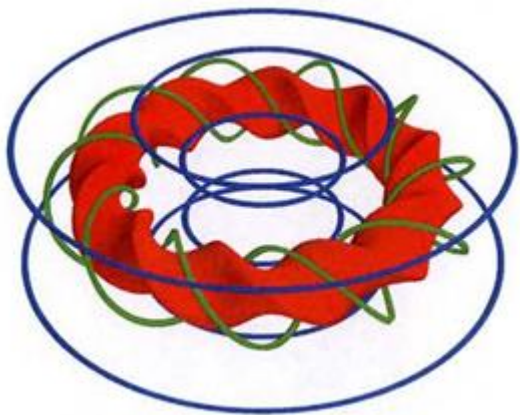
磁井相对深度

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{U_{\text{axis}} - U}{U_{\text{axis}}}$$

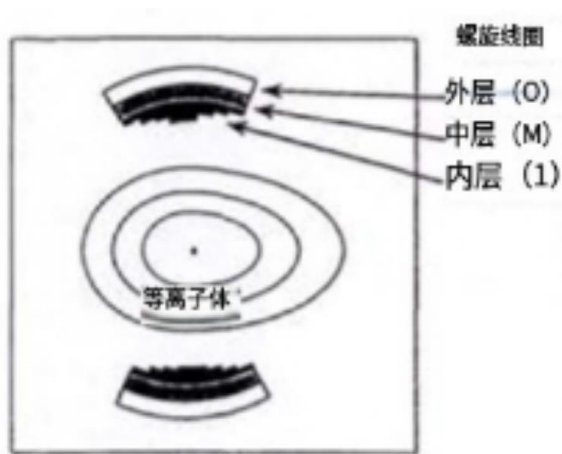
3.2 仿星器的构成：螺旋器代表：日本大型螺旋装置（LHD）

【螺旋仿星器LHD】日本国立聚变科学研究所（NIFS）的大型螺旋装置（Large Helical Device, LHD）于1998年投入运行。大半径为3.9米，小半径为0.6米，中心磁场强度**3T**，等离子体体积30立方米，是目前仅次于德国Wendelstein 7-X的世界第二大超导仿星器。在扭曲器的基础上**增加极向场线圈提供垂直场**，也可以加入环向场线圈来调节磁面的波纹度。LHD使用了**中性束注入（NBI）、离子回旋射频（ICRF）和电子回旋共振加热（ECRH）3种加热技术**，总加热功率达到36MW。LHD取得了许多成果，包括在高能量粒子的约束性能方面的实验验证、探索能量传输机制、验证控制技术和排气系统设计等。

LHD装置的等离子体形状(红色)
2根螺旋形线圈(绿色)
3对垂直场线圈(蓝色)



分层的LHD螺旋形线圈结构示意图



日本LHD局部



3.3 仿星器的构成：螺旋轴仿星器代表：H-1

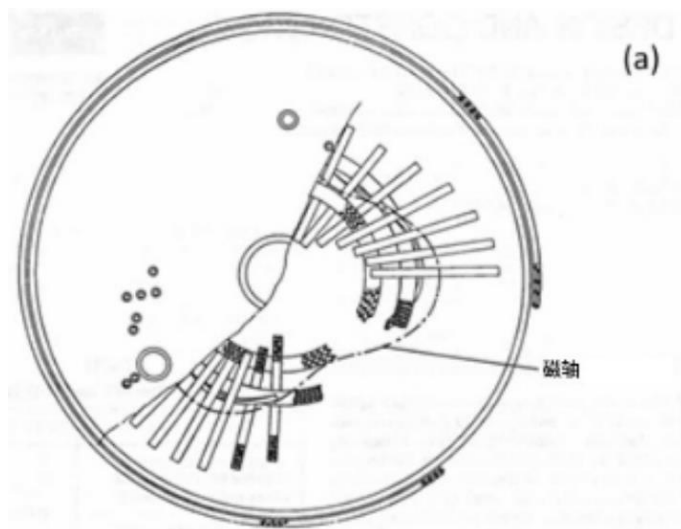
【螺旋轴仿星器H-1】H-1仿星器是一种中等规模的螺旋器，于1992 年开始运行，总价值3500万澳元，2009-2013 年投入 700 万澳元进行了升级改造。H-1仿星器内部构造远没有德国 W7-X 仿星器那么复杂。

H-1仿星器的磁场线圈系统共包括36个环向场线圈（toroidal field coils, TFC），1个中心环导体（Central Ring），即极向场线圈（poloidal field coil, PFC），1个螺旋线圈（helical control winding, HCW），1对内垂直场线圈（inner vertical field coils, IVFC），1对外垂直场线圈（outer vertical field coils, OVFC）。

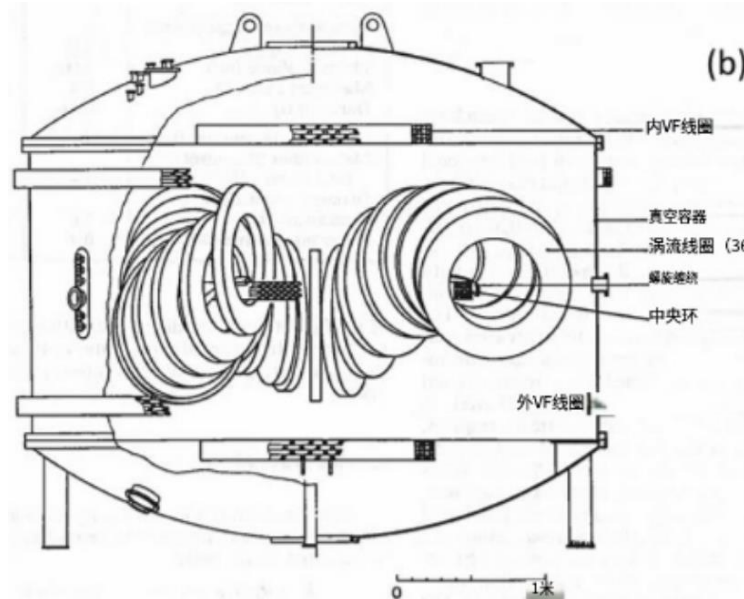
其中，环向场线圈、极向场线圈、螺旋线圈、内垂直场线圈都安装在仿星器真空腔体内，外垂直场线圈安装在真空腔体外。

通过改变各种线圈系统的输入电流比例关系，可改变磁场位形。

H-1仿星器俯视图



H-1仿星器主视图



H-1仿星器的主要参数

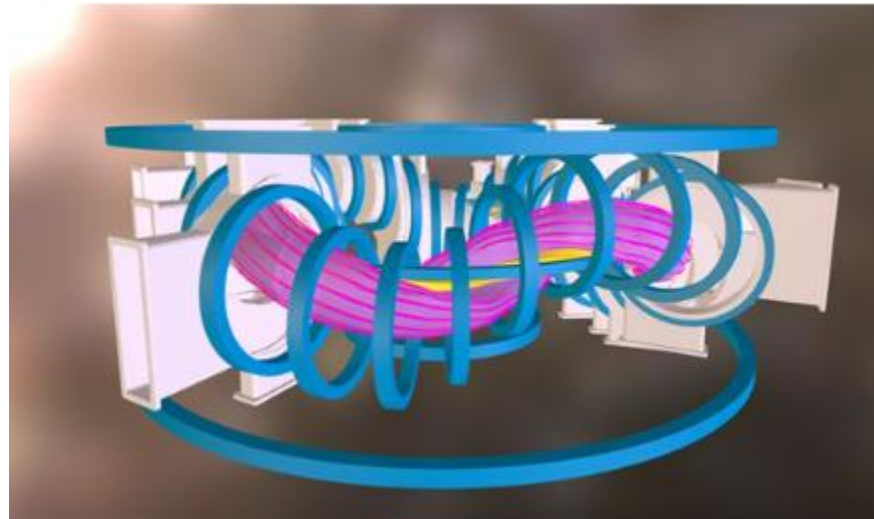
参数	数值
大半径	1.0m
小半径	0.1-0.2m
磁场强度	<1T
旋转变换	$0.6 < t < 2$
中心等离子体密度	$1-4 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
T_e	30eV
β	0.01-0.1%
加热量	ICRH, 4-20MHz $2 \times 200 \text{ kW}$
燃料	H/He, Ar

3.3 仿星器的构成：螺旋轴仿星器代表：西班牙TJ-II

【螺旋轴仿星器TJ-II】西班牙国家聚变实验室的TJ-II是紧凑型聚变实验装置，有92个用于实验诊断和机器系统的访问窗口。TJ-II主半径为1.5米，小半径为0.2米，使用高应力材料，装置的制造和组装精度很高，仿星器部件定位采用了基于计算机的经纬仪系统。TJ-II可形成1T的磁场，磁场由32个环向场线圈产生，其三维扭曲的中心轴线由两个中心线圈生成，一个圆形和一个螺旋形。

值得关注的是，TJ-II具有从0.9到2.5的旋转变换灵活性，这使得它能够改变磁井的形状，从-1%变化到6%。这些特点使得TJ-II成为强大的等离子体物理研究工具，提供了大量的等离子体行为数据，特别是不同磁场配置对等离子体约束、热量传输和稳定性的影响，为开发更大规模聚变装置提供了理论依据。

TJ-II示意图



3.3 仿星器的构成：螺旋先进仿星器

【螺旋先进仿星器】有两大主要特点：

- (1) 等离子体位型(或者说磁面形状)经过了特殊的优化以提高等离子体表现，比如增强磁流体力学(MHD)平衡稳定性、减小新经典输运(neoclassical transport)、优化湍流输运等；
- (2) 采用线圈优化程序设计易于建造的线圈系统，如模块化线圈。由于具有非轴对称的结构，捕获粒子的约束是仿星器面临的一个严峻挑战, 因此，限制捕获粒子的径向漂移是一个重要指标，而这个只受磁场强度B的影响。如果磁通面上的磁场强度等值线(等磁线)能够形成连续的闭合曲线，而不是孤立的最大值和最小值区域，捕获粒子的轨道将与托卡马克中的类似，我们称这种磁场为“omnigenous”场。最常见的实现omnigenous场的方法有两种：**准对称性**(quasisymmetry)、**准等磁力线**(quasi-isodynamism)。

实现omnigenous场的两种方式

	准对称性			准等磁力线
细分路线	准轴对称 (QA)	准极向对称 (QP)	准螺旋对称(QH)	
代表装置	美国PPPL的NCSX	ORNL的QPS	威斯康星大学的HSX	德国IPP的W7-X
特点	准对称仿星器对等离子体流动具有 最小的阻尼 。由于流动增加了各种MHD模的稳定性，并且剪切流动有抑制湍流的作用，因此准对称仿星器有望能够 改善MHD稳定性并减少湍流输运 。与一般仿星器相反， 准对称仿星器中允许存在一定的等离子体电流 。在Boozer坐标中，准对称仿星器中的 磁面上磁场总会在某个方向对称 ，根据对称方向不同，又可以分为QA、QP、QH。			准等磁力线仿星器中的等磁线沿着极向闭合，在这种磁场中， 自举电流会被尽可能地降低 。另外，与托卡马克装置中电流在内外侧不同流向而造成的偶极结构不同，准等磁力线仿星器 每一个周期内的磁面电流都是闭合的 。由于这种偶极电流产生了大部分的Shafranov位移。因此，理论上准等磁力线仿星器会 改善MHD稳定性，并且会比普通仿星器拥有更高的平衡β极限 。

3.3.1 仿星器的构成：螺旋先进仿星器代表—准等磁力线：德国Wendelstein 7-X

【德国Wendelstein 7-X】是目前全球最大的螺旋先进仿星器，由马克斯·普朗克等离子体物理研究所研制。在完成两个运行阶段后，装置进行了升级（2018年10月），2022年完成升级。25年6月3日，IPP宣布，W7-X在最新实验中创下等离子体**持续时间40s以上**的聚变三乘积记录，远超托卡马克在这个时间尺度上的三乘积记录。

W7-X的超导线圈系统包括50个模块化线圈和20个平面线圈，**模块化线圈**提供了约束等离子体的**主要磁场**（装置由5段完全一样的模块组成），而**平面线圈**主要用于调整等离子体位型。所有的超导线圈都由NbTi导体材料制成，运行在4K温度。磁场强度3特斯拉，这种模块化线圈结构设计使得等离子体可以实现稳态运行。

线圈制造、安装挑战很大，但得益于特殊的绕组技术结合高精度的测量，W7-X线圈的最大制造误差被控制在1mm以内。在组装时，通过采用大量的激光仪器测量精度、系统地调整程序和先进的焊接技术，最大安装误差小于4.4mm。此外，W7-X还额外放置了5个常规导体(铜)的修整线圈(trinl coils)，以修复最终的误差场。正是通过这一系列的努力，W7-X磁体产生的误差场被控制到一个空前的精度(十万分之一)。

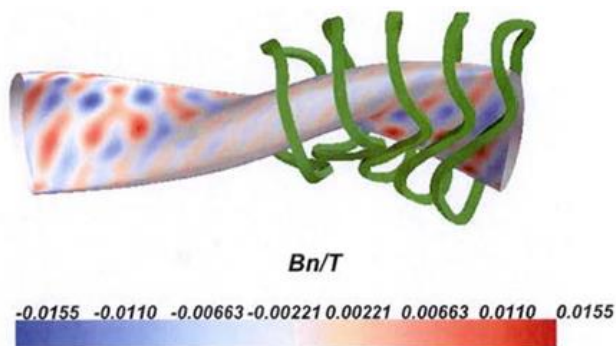
其他核心部件还包括**低温恒温器**（维持超导环境），**加热系统**（电子回旋共振加热技术，15MW加热功率），**先进偏滤器、传感器、探测器**系统等

W7-X仿星器超导线圈示意图



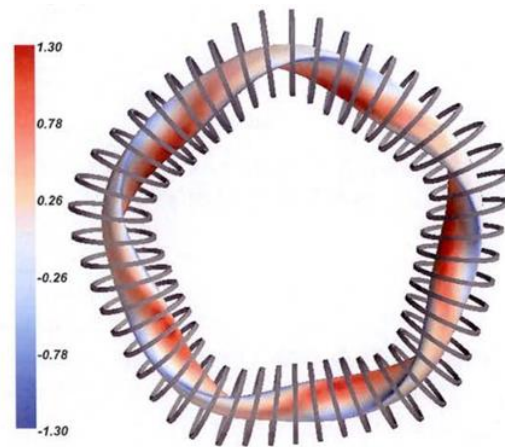
蓝色的为**非平面的模块化线圈(50个)**，红色的为**平面化线圈(20个)**。这些线圈分布在完全一致的五个周期上，每个周期内的两个半周期又符合仿星器对称性(镜像对称)。因此，总共有5个独特形状的模块化线圈和2个独特形状的平面化线圈。

W7-X一个周期的目标边界形状及磁场分布



W7-X仿星器一个周期的目标边界形状及T分布，五个独特的线圈(绿色)虽然被画成矩形截面，但是在计算中被采用的是中心导线模型。

W7-X初始线圈形状



初始线圈形状及其产生的磁场B与目标磁场法向分量T之间的差别，等离子体边界面上的颜色表示(B-T)的大小。

为了探索聚变反应堆量级的稳态运行的可能性，W7-X**最大设计放电时间高达30分钟**。2015年12月，W7-X仿星器顺利放电。2018年10月，装置进行了升级，2022年完成升级。2023年2月，Wendelstein 7-X以更长的约束时间和更高的功率重新开始聚变实验。2025年6月，W7-X在长等离子体放电中创造了三重积的新世界纪录，将这一核聚变关键参数的新峰值维持了**43秒**。这意味着在更长的等离子体持续时间内，W7-X仿星器超过了当前最主流的磁约束核聚变装置托卡马克的最佳性能。

3.3.2 仿星器的构成：螺旋先进仿星器代表—准螺旋对称：威斯康星大学HSX

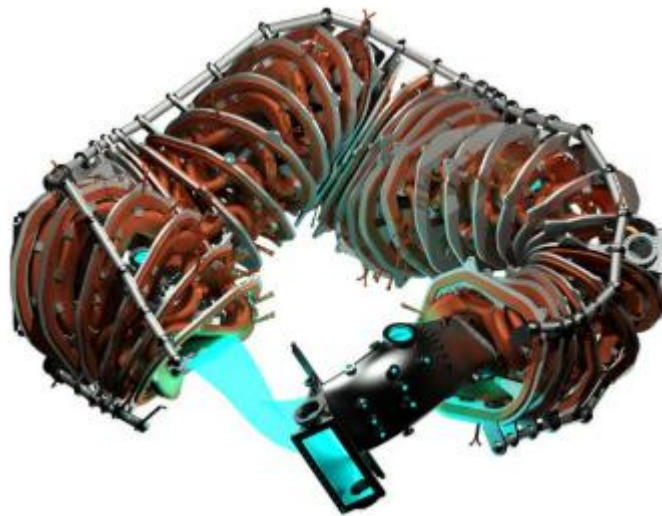
【威斯康星HSX】美国威斯康星大学麦迪逊分校的准螺旋对称仿星器（Helically Symmetric eXperiment, HSX）是全球唯一一种具有准螺旋对称（QHS）磁场结构的仿星器装置，于1999年开始运行。

HSX采用**模块化设计**，这种设计有助于研究人员对等离子体行为进行更精细的控制和研究。

HSX的外部电磁铁系统能够产生**1T**的磁场约束等离子体，另有一组**辅助线圈**用于破坏对称性，以模仿常规的仿星器属性并进行比较。

HSX的设计允许进行更平稳和连续的操作，与托卡马克的脉冲操作方式相比，可能更适合连续能量输出。

威斯康星准螺旋对称仿星器HSX示意图

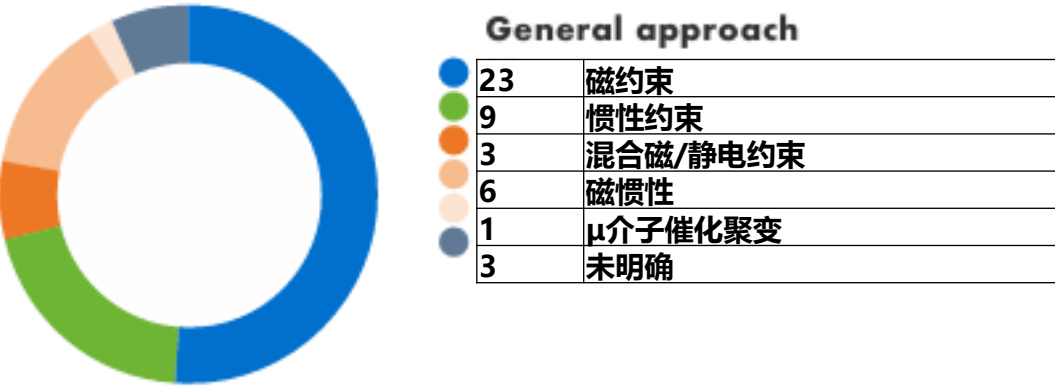


4. 仿星器的投融资情况

3. 全球核聚变布局技术路径统计

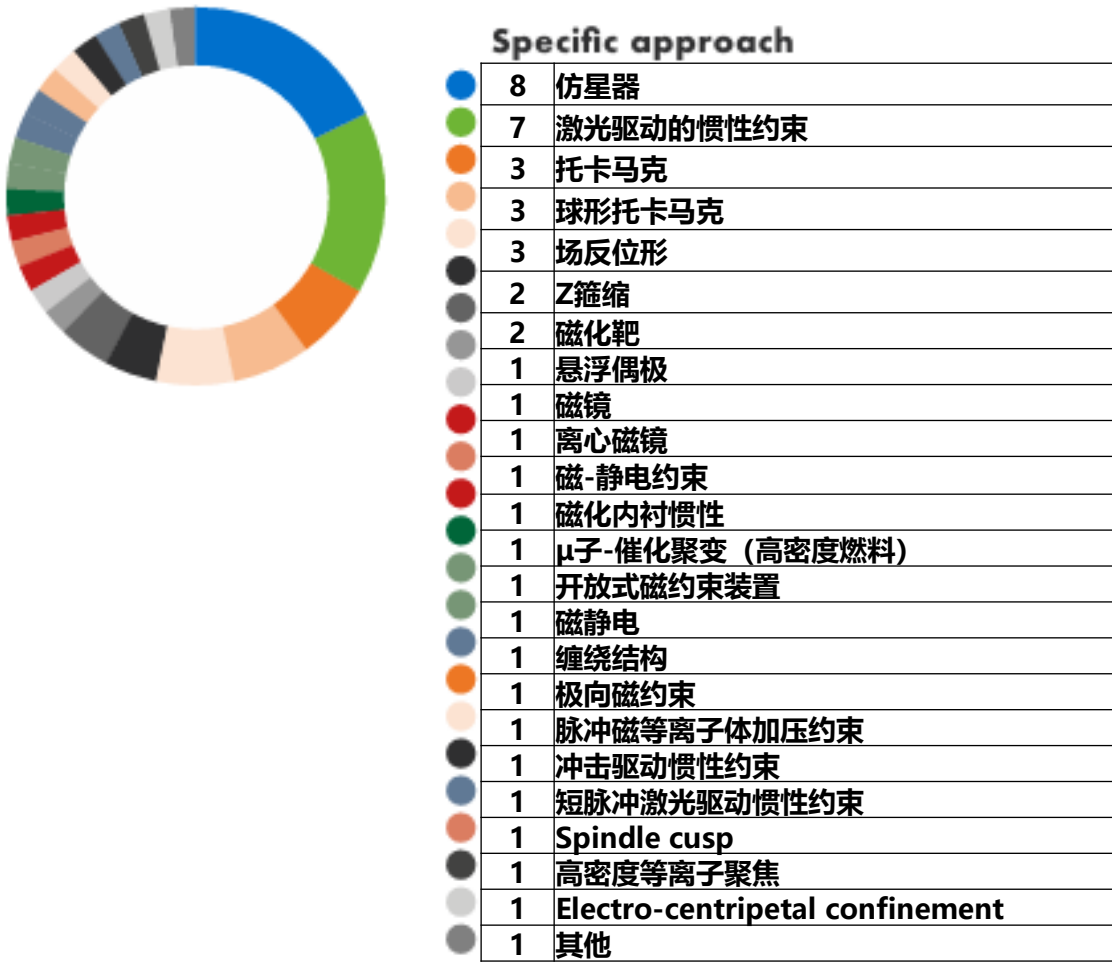
从FIA 2024年统计数据来看，全球44家私营企业中，23家布局磁约束路线，其中，8家布局仿星器路线，仿星器也是当前创业企业选择最多的技术路线。

主要路径：

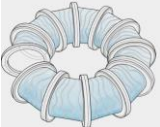


注：以上数据来自FIA统计，部分国家实验室未统计在内，以私营企业为主

细分技术路径：



3. 全球主要布局私营企业

	公司	装置图片	背景	目标	进展	技术路径
美国	Type One Energy			计划2026年启动首台原型机“Infinity One”建设， 到2030年代中期为电网提供350MW电力	5年5月，完成其“Infinity Two”（无限二号）仿星器聚变反应堆发电厂的首次正式设计审查	装置高近14米，可产生800MW能量，转化为350MW电力。核心技术在于 高温超导磁体 ，在紧凑结构中生成强磁场，较传统设计体积缩小40%。
	Thea Energy		普林斯顿等离子体物理实验室（PPPL）和普林斯顿大学分拆成立	2022年	25年3月，成功演示全球首个超导平面线圈磁体阵列	另辟蹊径，开发“ 磁像素 ”（magnetic pixels）技术：通过数百个可独立控制的 高温超导平面磁体 ，动态调整磁场形态，彻底摒弃传统仿星器的复杂扭曲磁体。
	Stellarex		普林斯顿大学的衍生公司，三位创始人曾在美国、英国、德国和法国的世界上最重要的聚变实验室担任领导职务			
欧洲	Proxima Fusion		W7-X技术嫡系传承，IPP衍生企业	计划2027年建成 高温超导测试磁体 ，2031年推出示范装置	25年2月发布发布“Stellaris”设计	针对磁体制造复杂度，通过早期计算模拟优化布局，将制造成本预期显著降低，成为首个实现“设计-制造”数字化闭环的团队。
	Gauss Fussion		由法国、意大利、德国、西班牙多位有工程专业经验的专家创立	建造真正可落地的核聚变电厂。从创立之初，确保工业可行性便是其指导原则，还计划从氘-氘（DT）过渡到氘-氦（DD）燃料，目标是 到2045年建造一座GW级发电厂 。	目前正在攻克闭环燃料循环，启动氦增殖包层系统评估工作	
	Renaissance Fusion			实现能源消耗和碳排放脱钩		不是通过设计复杂的三维线圈来产生磁场，而是 通过使用激光在圆柱体上的绘制轨道来改变磁场分布 。使用液态锂将等离子体与外界隔开，还可以提取仿星器热量，并产生蒸汽。
日本	Helical Fusion		日本国家核聚变科学研究所的科学家创立	计划在2034年启动世界上第一个稳态核聚变反应堆，并在2040年代开始商业运营，预计其发电能力将达到50至100兆瓦。	下一步将着力解决 高温超导线圈 等技术难题，并计划筹集1万亿日元（约72亿美元）的资金来建设试验反应堆。	
以色列	N.T.TAO					专注于紧凑型聚变技术领域，该公司专有的等离子体加热方法有望实现比其他聚变反应堆高1000倍的密度，从而使聚变反应的效率提高100万倍，产生的能量明显高于其他正在开发的解决方案。

5. 投资建议

• 5. 投资建议

投资建议：

仿星器与托卡马克装置的成本构成基本相当，但其中，包层模块、磁体占比有所提升，建议关注

- 1) 超导磁材/磁体：永鼎股份、联创光电、精达股份、东方钽业、西部超导。
- 2) 堆内构件：合锻智能、国光电气、安泰科技、派克新材、上海电气、海陆重工、江苏神通、斯瑞新材；
- 3) 电源：旭光电子、王子新材、四创电子、英杰电气、爱科赛博、新风光。
- 4) 燃料、检测、辅助系统：国光电气、景业智能
- 5) 3D打印：铂力特、南风股份；
- 6) 核心模块建设及分系统制造：利柏特、中国能建

6. 风险提示

• 3. 全球核聚变布局技术路径统计

核聚变技术研发不及预期风险。核聚变不同于成熟的核电，目前在反应原理、材料等各方面仍有挑战尚未克服，若研究团队研发进展不顺利，可能会导致后续项目建设进展以及订单的释放，进而影响相应设备企业收入、利润。

投资不及预期风险。核电、核聚变项目投资额普遍较大，在数百亿元级别，尤其是聚变项目，目前处于技术还未完全成熟阶段，若未来科研院所及民营企业项目融资不顺利，可能会导致相应设备厂商的订单、收入不具有持续性。

交付节奏不及预期风险。核电及核聚变项目建设周期普遍较长，且前期需要长期的技术论证，若项目交付进展不及预期，可能会导致设备企业营收、利润受到影响。

原材料价格波动风险。核设备涉及很多钢材、铜、不锈钢等，且用量较大，若原材料价格波动较大会影响设备企业毛利率，进而影响企业盈利水平。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为C3及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

类别	评级	说明
公司评级	强烈推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有20%以上的涨幅。
	推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的涨幅。
	中性	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数在-10%和10%之间波动。
	减持	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的跌幅。
行业评级	推荐	分析师预测未来12个月内行业表现强于同期基准指数。
	中性	分析师预测未来12个月内行业表现与同期基准指数持平。
	减持	分析师预测未来12个月内行业表现弱于同期基准指数。
基准指数说明		A 股市场以沪深300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普500指数为基。



方正证券研究所

专注 · 专心 · 专业

北京市朝阳区朝阳门南大街10号兆泰国际中心A座17层
长沙市天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

上海市静安区延平路71号延平大厦2楼
深圳市福田区竹子林紫竹七道光大银行大厦31层

广州市天河区兴盛路12号楼隼峰院2期3层方正证券