

人造恒星：高性能核聚变发电机的结构完整性评估

偏滤器是一种小型核聚变设备，能将全尺寸反应堆的功率压缩到研发试验台中。MIT 等离子体科学与核聚变中心的研究人员使用数值仿真来计算并优化高级偏滤器实验的设计提案。

作者 JENNIFER SEGUI

太阳内部时时刻刻在发生核聚变，在氢原子核发生聚变形成更大的氦原子的过程中释放出大量辐射能，并伴随着质量的损耗。尽管地球与太阳之间的平均距离约为 9300 万英里（约合 1.50 亿公里），我们还是能在地球上以太阳光的形式观察到这种能量。

50 多年来，国际社会一直致力于研究将氢聚变作为一种清洁、安全、取之不尽的能源的可行性。在麻省理工学院 (MIT)，通过极高磁场的方法来实现聚变是一个重要的研究方向。MIT 的等离子体科学与聚变中心 (Plasma Science and Fusion Center, PSFC) 研究人员正在结合实验、前沿理论和数值仿真来确认及理解相关科学原理和技术，希望能加速聚变能的开发。

高级偏滤器实验 (ADX) 是一种核聚变实验，更具体地说，它是由 PSFC 的研究人员提出的一种托卡马克实验，用于短周期等离子体放电提供聚变反应堆的热通量、密度和温度（见图 1）。

托卡马克装置内的温度将超过 1.5 亿摄氏度，会造成电子从原子核脱离，从而使气态氢燃料形成全电离的超高温等离子体。堆芯等离子体维持在一个环形或甜甜圈形状的真空容器中，保持高

压，以便生成带有较高碰撞率的稠密等离子体。外部磁场对等离子体的限制和控制，类似于强引力场对太阳内核的影响，因此会产生核聚变。

“高温超导体领域最新的一些进展使我们能设计出一个可以在更高磁场下工作的托卡马克装置，将等离子体的性能提升到反应堆级。” PSFC 的机械工程师 Jeffrey Doody 解释说，“研究重点随即从改进等离子体的性能转为托卡马克装置内的支持系统。”

Doody 和他的同事正在借助数值仿真设计 ADX 的结构，希望能维持反应堆级的热通量和磁场，以便将它打造为功率排气系统和等离子体-材料相互作用的试验台，来支持下一阶段聚变设备的开发。

⇒ 对抗等离子体破坏

ADX 真空容器的设计提案非常具有创新性，它没有采用之前的单个柱体设计，而是由五个呈轴对称的单独壳体构成，如图 2 所示。这种模组设计能选出合适的电磁线圈，用于测试不同的偏滤器配置，其中，功率排气系统中的偏滤器组件用于从托卡马克装置中移除聚变灰烬。当离子逃离等离子体控制磁场

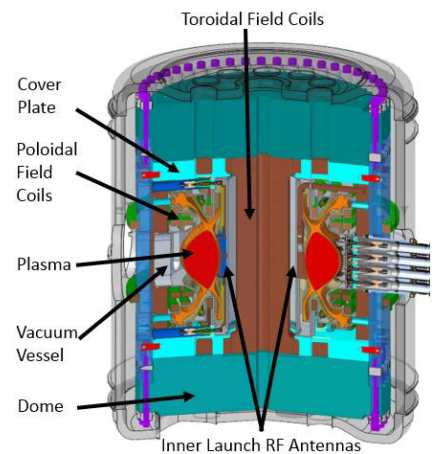


图 1. MIT PSFC 的 ADX 托卡马克设计提案示意图。图注：Toroidal Field Coils - 环向场线圈；Cover Plate - 盖板；Poloidal Field Coils - 极向场线圈；Plasma - 等离子体；Vacuum Vessel - 真空容器；Dome - 圆形凸面；Inner Launch RF Antennas - 内部视频发射天线

的限制后，偏滤器将对其进行收集并将它们导出容器。

模组容器不仅要承受发生核聚变时所需的高热通量和磁场，还要能承受等离子体破裂，这是等离子体发生塌缩时真空容器壳体另一个应力源。

“为了评估 ADX 容器的设计，我们在 COMSOL Multiphysics® 中执行了一个数值仿真，用于预测磁场、涡电

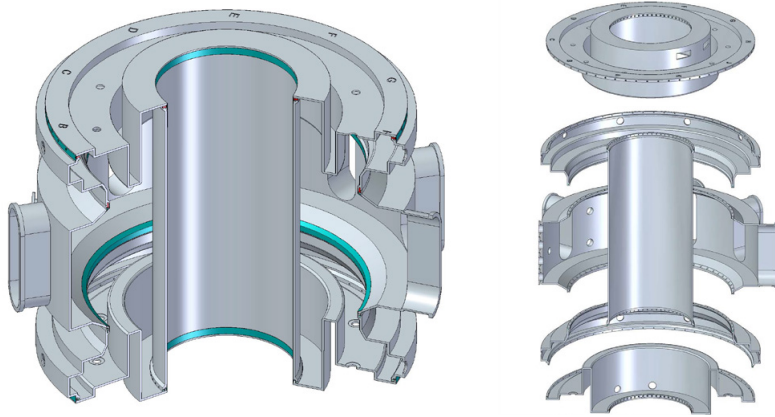


图 2. ADX 真空腔的设计很独特，由五个焊接在一起的单独壳体组成。

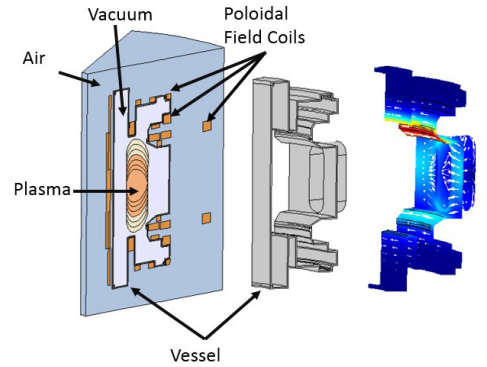


图 3. 模型的几何结构(左)，用于确定 ADX 真空腔壁中的涡电流(右)。图注: Vacuum - 真空; Air - 空气; Plasma - 等离子体; Vessel - 容器; Poloidal Field Coils - 极向场线圈

流以及由等离子体破裂产生的洛伦兹力。”Doody 解释说，“然后将计算得到的载荷施加在容器的单个结构模型中，以便预测应力和位移。”图 3 为 ADX 循环对称磁场模型的几何结构，包括容器、等离子体和极向电磁线圈，负责将等

离子体保持在平衡位置上。

等离子体会携带 150 万安培的电流向上漂移，在 10 毫秒后停止移动，并在 1 毫秒内损失所有电流，这是垂直移动现象 (VDE) 中可能出现的最严重的等离子体破裂情况。破裂的等离子体周

围磁场的迅速变化会在真空容器的壳体内产生电涡流。当电涡流通过托卡马克中用于限制等离子体的极向磁场和更强的环向磁场时，会在容器上产生洛伦兹力。

在 VDE 中，因为电涡流与容器壁非常近，所以电涡流的幅值较大，因此，VDE 就是 ADX 计算模型的测试用例选择。图 3 展示了从数值模型中计算得到的电涡流分布。他们开发了第二个模型来确定由托卡马克中的环向磁场产生的洛伦兹力，而在第一个 ADX 模型中只加入了极向磁场。

⇒ 增强 ADX 真空容器

等离子体破裂会产生较强的洛伦兹力，并将作用在 ADX 壁上，对应于 VDE 中真空容器的上腔体和下腔体。如图 4 所示，在 ADX 容器的结构模型中，上下边界均连接在容器盖上，并且不会在仿真中发生位移。在相关边界上施加载荷，对应于作用在容器上的洛伦兹力。该测试案例确定了 150 万安培电流、6.5 特斯拉环向磁场强度下的托卡马克中的洛伦兹力。

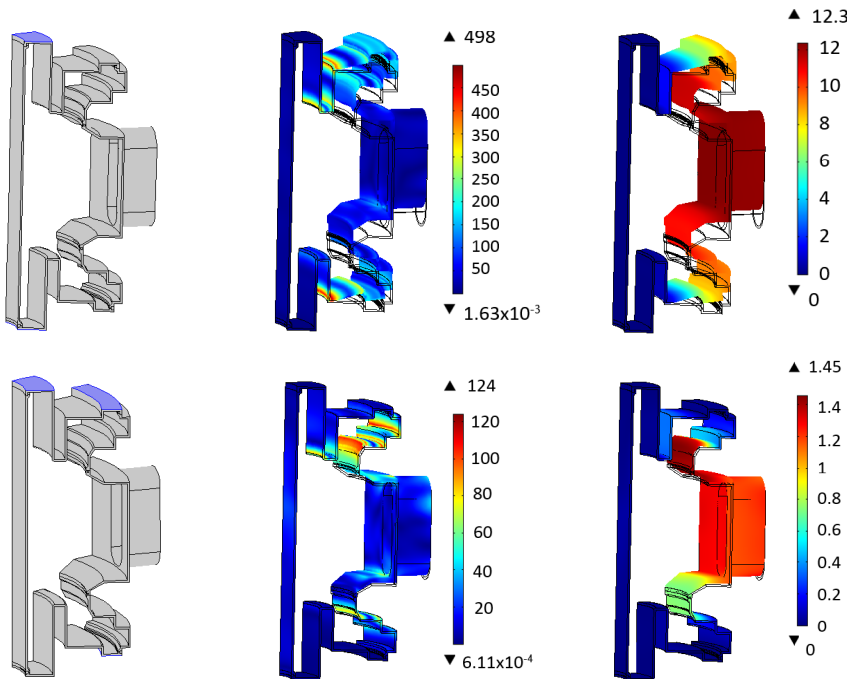


图 4. 上方为 ADX 结构模型的几何结构，紫色边界为结构的固定位置。应力和位移的仿真结果说明需要对设计进行加固。当在 ADX 设计中增加支撑块后，下方的模型几何结构显示了对应的新增固定边界。

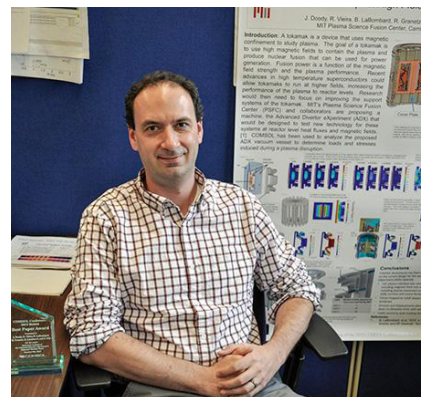
模组容器零件由铬镍铁合金 625 制成，这是一种强韧的镍基合金，对电流有较强的抵抗性，因此能尽量减少电涡流。材料的屈服应力是 460 MPa，而 ADX 的设计标准规定容器壁经受的应力不应超过 306 MPa，即屈服应力值的 2/3。

数值仿真结果显示，如果不更改设计，由 VDE 产生的洛伦兹力将在容器中造成接近材料屈服值的较大应力，并会使结构发生 1 cm 的挠曲。为了加固真空容器，设计中增加了一个支撑块用于固定容器的另一个边壁，如图 4 下行

所示。从安装支撑块后的仿真结果中可以看到，容器壁的应力和位移出现了明显的下降，说明加固后的真空容器能够承受等离子体的破坏，并支持 ADX 的运行。

⇒ 核聚变的下一阶段及未来计划

以模拟仿真为导向的设计方法将保证 ADX 在 PSFC 的安全与成功运行。最终，它将发展成为最新型的聚变设备，并能为测试聚变反应堆中需要的偏滤器概念提供一个优秀的研发平台。❖



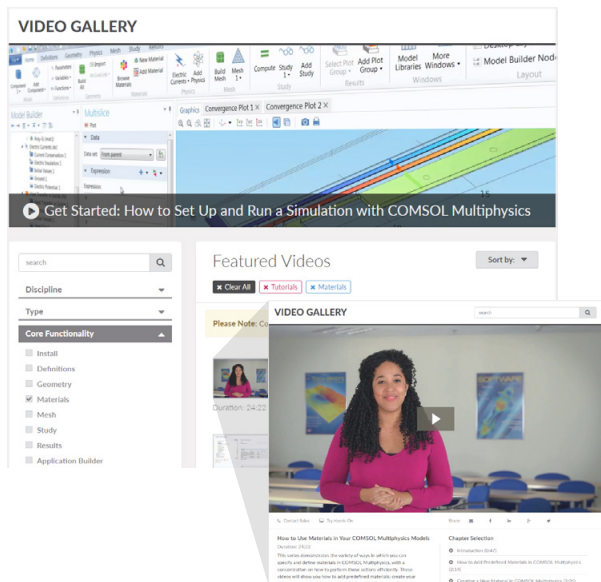
Jeffrey Doody 是 MIT 等离子体科学与核聚变中心的机械工程师。照片摄于 COMSOL 用户年会 2015 波士顿站，Doody 的仿真作品获得了当年的最佳论文奖。

COMSOL 视频中心： 交互式的学习工具

作者 **ANDREW GRIESMER**

教程系列

教程视频介绍了 COMSOL 软件的使用，从建立几何模型，到结果后处理，以及其中涉及的所有步骤。视频内容涵盖从具体特征介绍到高级使用技巧。不论是初级用户，还是资深的仿真专业人员，您都能在视频中心找到适合您的内容。每个视频的制作都借鉴了来自 COMSOL 技术支持团队的专业意见。



目前 COMSOL 视频中心收录了 200 多个视频，每周还在持续发布新的视频。希望这些视频能更好地为 COMSOL Multiphysics® 软件及 COMSOL Server™ 产品的用户提供支持，帮您更加有效的利用数值仿真带来的优势。

模型展示

希望了解如何模拟特定物理现象吗？模型展示视频将向您演示模拟各种现象的完整步骤，例如电磁、结构力学、非等温流、声学、化学反应、MEMS、微流体等。视频将能帮您直观了解如何在 COMSOL Multiphysics® 中开发模型，如何将模型转化为带有友好用户界面的支持其他用户通过 COMSOL Server 访问的定制 App。

主题演讲

聆听各行业工程师及科学家的演讲，了解他们在各自领域对数值仿真的灵活应用。每一年，在全球各地举办的各项活动中，COMSOL 用户都会积极展示他们的最佳实践与创新设计。现在，您只需在计算机前就可以轻松观看这些演讲与展示。

COMSOL 在线视频

访问视频中心页面 cn.comsol.com/videos，观看丰富的视频资源。