

# 螺旋天线助力核聚变反应

通用原子能的科研人员利用多物理场仿真在 DIII-D 托卡马克装置中实现磁约束聚变。

作者 GEMMA CHURCH

核聚变是一种能量产生的过程。在这个过程中，两个氘原子被加速到足以克服库仑力的水平，融合成一个氦原子和一个中子，释放出巨大的能量。核聚变不仅无碳排放，废弃物产生量少，而且燃料来源几乎取之不尽，因此堪称能源生产的终极手段。核聚变是太阳燃烧的动力，如果人类能够在地球上掌控这种能量，将有望引发一场清洁能源革命。

## » 保持托卡马克装置的最佳状态

托卡马克设计依靠磁场限制热等离子体，具有很高的可行性。等离子体是一种电离气体，它由正离子和自由电子组成，近似电中性。通常情况下，等离子体是在低压下产生的。

托卡马克聚变装置使用一系列磁线圈，在环形腔室内产生等离子体，并使之在装置内稳定(图1)。然后，使用外部加热系统将等离子体加热到摄氏1.5亿度的极高温，以实现核聚变。

在美国圣地亚哥，通用原子能公司(General Atomics, 简称GA)代表美国能源部运行 DIII-D 国家聚变设施，为

推动实现磁约束聚变而持续努力。作为一座面向用户开放的设施，DIII-D 托卡马克接待了 650 多位来自世界各地的研究人员在此进行最前沿的聚变研究。

DIII-D 托卡马克运行小组使用多物理场仿真优化操作流程和诊断设备，确保整个设施处于最佳运行状态。DIII-D 托卡马克首席操作员，通用原子能公司的 Humberto Torreblanca 指出：“得益于 COMSOL Multiphysics® 软件，我们无需再使用简化模型进行工程分析，也不必假设所处理的问题是理想化的场景。我们可以研究托卡马克的复杂几何形状，并构建出一系列复杂的多物理场模型。”

“因此，我们可以设计并推进我们的构想，而不会损坏设备。仿真能够提供非常准确的结果，让我们不必依赖于简化的假设进行计算。”Torreblanca 补充道。

以前，运行团队虽然已经能够分析 DIII-D 托卡马克的内部磁场，但还是不得不简化磁场来分析外部磁场(图2)。Torreblanca 解释说：“托卡马克被许多组件和系统所环

绕，磁场产生的各种力和电流可能会影响和损坏这些系统。仿真分析有助于避免潜在损害以及研究项目延误所引起的高昂代价。”

Torreblanca 使用 COMSOL 软件中的 LiveLink™ for SOLIDWORKS® 模块导入托卡马克几何结构，以研究托卡马克外部特定位置上的磁场，并观察磁场对特定系统的影响。

Torreblanca 指出：“这个模型很容易建立，为我节省了很多时间，从而取代了以前那些耗时的方法。”

静态、缓慢或快速变化的磁场曾经损坏过托卡马克的一些真空涡轮泵，而这些泵对托卡马克上的主系统和子系统都至关重要。通过多物理场仿真，该小组

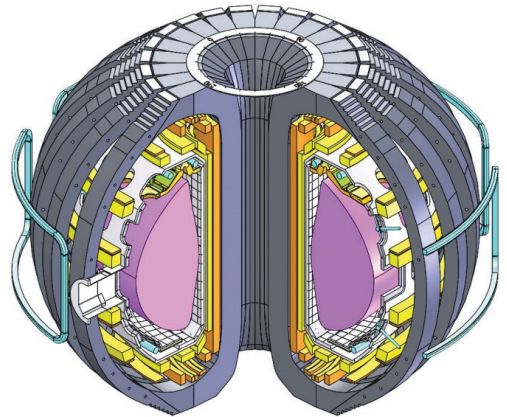


图1. DIII-D 托卡马克核聚变装置内部视图。

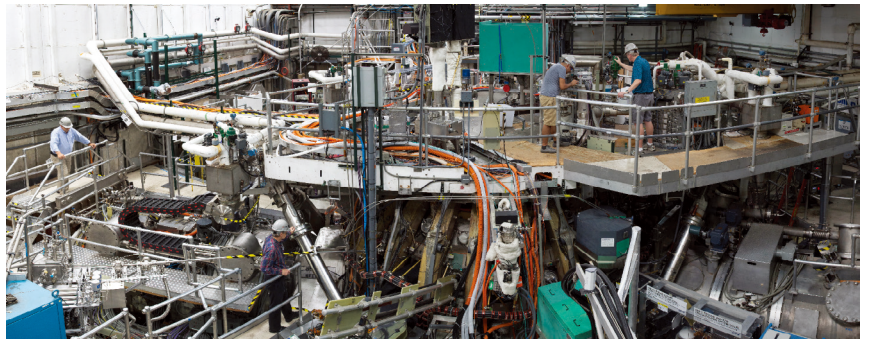


图2. DIII-D 托卡马克装置被暴露在强磁场中的复杂系统和组件所包围。

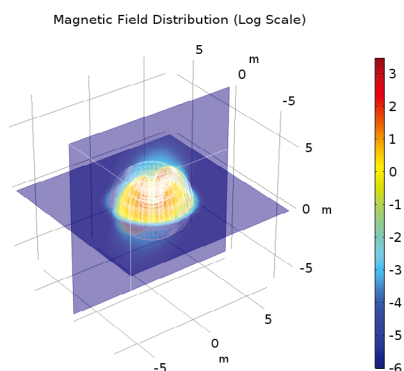


图 3. 托卡马克容器内外磁场分布的仿真结果。图注: Magnetic Field Distribution(Log Scale) - 磁场分布(对数标度)

显著改进了托卡马克容器外部的时变磁场分布分析,从而找到泵的最佳安装位置,提高了系统可靠性(图 3)。

## » 螺旋天线成就人造太阳

为了实现核聚变, DIII-D 托卡马克装置需要达到比太阳核心温度高 10 倍的温度。为了实现这一目标,目前的托卡马克装置采用了两个系统(图 4):中性束系统和电子-回旋加热系统。20 兆瓦能量的高能氦原子被注入到中性束系统中,而在回旋加热系统中,回旋管被注入了高达 4 兆瓦的微波能量以加热电子。一种新型的加热系统(图 5)正在设计与建造中,该系统采用了能注入 1 兆瓦的射频能量的螺旋天线。

多物理场仿真成为了优化螺旋天线设计的基础。DIII-D 将是第一台以兆瓦级功率使用这种天线的托卡马克装置,同时它能将射频能量耦合到等离子体,并通过专门的代码来驱动电流并加热等离子体以达到预期效果。

螺旋天线由包含 2 个端模块和 28 个中心模块的 1.7 米阵列构成。能量可以通过直接连接到端模块的两条带状线从天线的任意一端注入,然后依次感

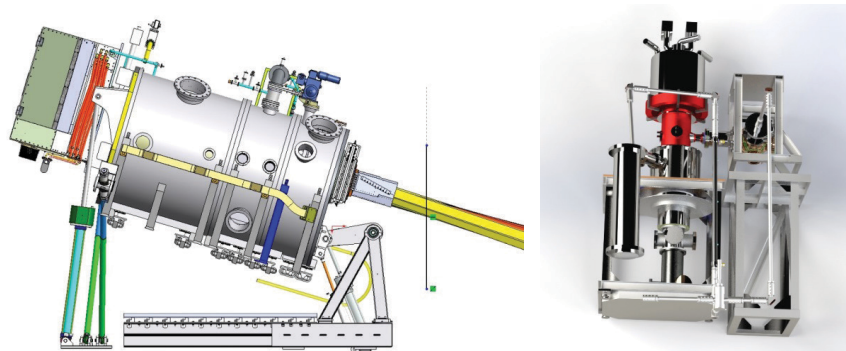


图 4. 当前 DIII-D 装置外部加热系统:中性束(左)和回旋管(右)。

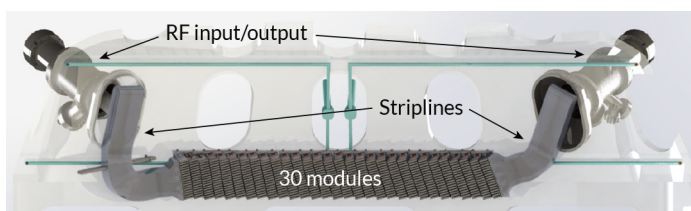


图 5. DIII-D 托卡马克装置上的螺旋天线。

应耦合到每个无源中心模块。DIII-D 中的等离子体可持续长达 10 秒,脉冲间隔为 10 到 15 分钟,为系统冷却到室温提供了充足的时间。天线的设计遵循相同的运行周期。

Torreblanca 解释说:“多物理场仿真赋予我们尝试新材料的能力,并让我们清晰地了解哪种材料可以提供最好的结果。天线需要能经受由等离子体干扰所引起的强电磁力,因为这会在天线内产生强大的电流。为了减小这种电流,天线需要采用低电导率的材料,但同时又要求材料具备很高的热传导率,才能消散天线因暴露于等离子体而承受的高温。混合了铬锆铜(CuCrZr)和因康镍合金(Inconel)的设计为我们提供了两类材料最佳的综合优势。仿真则使我们的工作变得更容易,因为我们只需点击电脑屏幕,就能查看使用多种不同材料的性能表现。”

Torreblanca 认为:“计算天线的

电磁场并将其可视化并不困难。我们可以耦合电磁场分析与传热,模拟射频损耗分布,从而得到热点分布图。这可以帮助我们进一步完善天线的设计。”

天线在其谐振频率(476MHz)下被激励,而通用原子能的团队则需要知道温度对这一频率的影响。Torreblanca 说:“我们需要了解天线谐振频率是否会随温度的变化而发生漂移,这样我们就可以通过天线设计或工作参数对其进行补偿,以便让天线能稳定地工作 10 秒。”

“多物理场仿真帮助我们模拟了一系列物理场景中的温度分布。这意味着,我们可以计算出能否在不损坏天线的情况下使用 10 秒钟,或者我们可以计算天线是否能工作几秒钟,并且还能驱动电流并加热等离子体,”Torreblanca 补充道。

## » 小实验,大见解

DIII-D 小组建造出了关键天线组

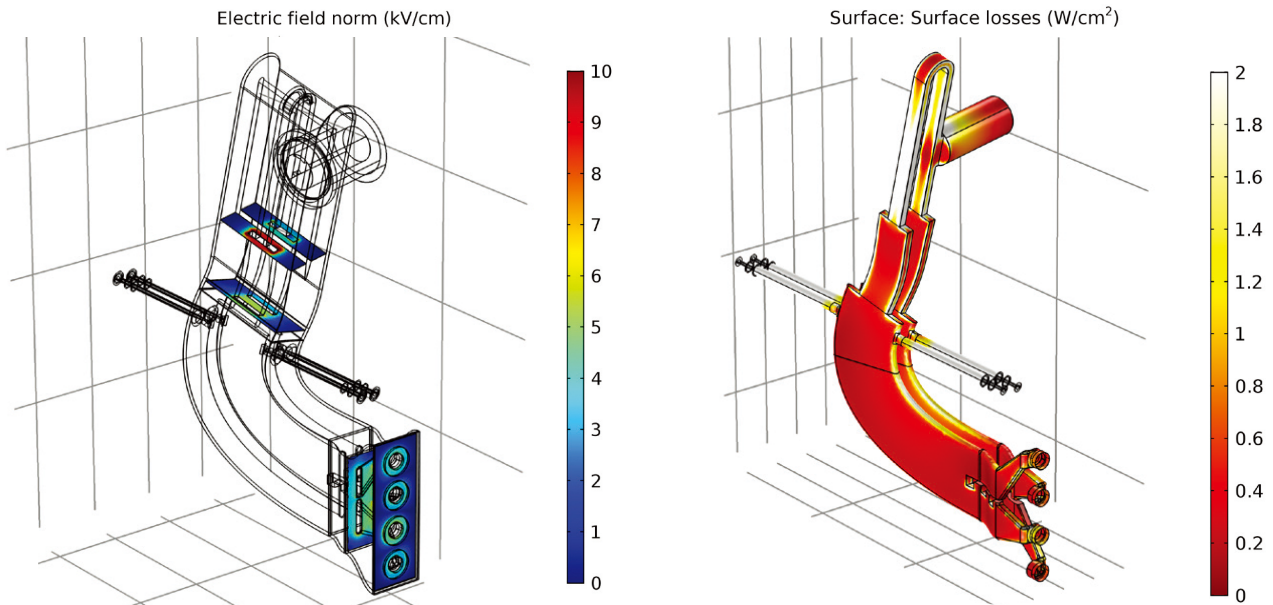


图 6. 天线上带状线的电场分布(左)和射频损耗(右)。

件的等比缩小测试模型。通过与多物理场仿真相结合,在建造全尺寸天线组件之前,该小组能够对这些组件的参数和条件进行先行测试。测试包含四分之一比例模型,以及用于还原全尺寸天线模块及其带状线电场值的 RF 谐振器外壳,以查明电弧或次级发射倍增现象是否会对系统产生不利影响(图 6)。“我们正在验证这些天线组件的等比例缩小模型。目前仿真与实验结果良好吻合,这让我们对天线的参数和几何结构的设计更有信心了。” Torreblanca 说道。

“通过仿真得到的见解总是很有启发性。对物理场的运作方式和仿真结果的研究,加深了我们对设计和装置性能的理解。我们有信心该系统将按照预期的方式工作。” Torreblanca 补充道。

DIHI-D 研究项目是全球开发可行核聚变装置的关键环节。在很大程度上,这应归功于各机构之间的高度协作,以及仿真和建模带来的便利。

Torreblanca 总结道:“我们正致力于解决全球能源问题。如果我们能利用 COMSOL 软件及时取得有益的结

果,那将意味着我们朝实现核聚变又迈进了一大步。”

#### 鸣谢:

本文涉及的工作材料由美国能源部(DOE)、科学办公室、聚变能源科学办公室资助。工作中使用了 DOE 办公室科学用户设施之一——DIHI-D 国家聚变设施所完成的工作,资助编号 DE-FC02-04ER54698。

#### 免责声明:

本报告由一家美国政府机构赞助编写。美国政府及其所属任何机构或任何雇员,均未以任何明示或暗示的方式,对所披露的任何信息、设备、产品或过程的准确性、完整性或实用性进行任何担保,或承担任何法律责任或义务,或表明其使用不会侵犯私人拥有的权利。本文中以商品名称、商标、制造商或其它方式指代的任何特定的商业产品、工艺或服务,并不一定意味或暗示美国政府或其任何机构的认可、推荐或偏好。本文作者所表达的观点和意见不一定阐述或反映美国政府或其任何机构的观点和意见。

“得益于 COMSOL Multiphysics® 软件,我们无需再使用简化模型进行工程分析,也不必假设所处理的问题是理想化的场景。我们可以研究托卡马克的复杂几何形状,并构建出一系列复杂的多物理场模型。

——Humberto Torreblanca, 通用原子能公司 DIHI-D 托卡马克装置首席操作员