

# EAST 外杜瓦协同仿真技术的研究

朱哲<sup>1</sup>, 傅鹏<sup>1</sup>, 朱银锋<sup>2</sup>

(1. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 安徽建筑工业学院机械与电气工程学院, 合肥 230601)

摘要: 为验证 EAST (Experimental and Advanced Superconducting Tokamak) 外杜瓦工程设计的可靠性, 借助三维设计软件 CATIA 和有限元分析软件 ANSYS, 基于协同仿真技术对其进行了研究<sup>[1-5]</sup>, 结果与 EAST 运行过程中外杜瓦的实验数据较好的吻合, 进行的研究为同类装置外杜瓦的研发提供了有益的参考。

关键词: 外杜瓦; 协同仿真; 有限元分析

## Study on the vacuum cryostat for EAST based on co-simulation technology

Zhu Zhe<sup>1</sup>, Fu Peng<sup>1</sup>, Zhu Yin feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China)

**Abstract** In order to verify the reliability of engineering design of the vacuum cryostat for EAST (Experimental and Advanced Superconducting Tokamak) device, an analysis was done with CATIA V5 R19 and ANSYS 12.0 based on Co-simulation technology. The results of simulation agreed well with the experimental results. All the studies will provide valuable reference for the development of cryostat for similar devices.

**Keywords** Cryostat; Co-simulation; Finite element analysis

## 1 引言

EAST 全超导托卡马克核聚变实验装置是国家“九五”大科学工程项目。它的主机装置主要由超导极向场系统、超导纵场系统、真空室、内外冷屏、外真空杜瓦及支撑结构等几大部分组成, 如图 1 所示<sup>[6-8]</sup>。其中, 外真空杜瓦为内部部件提供高真空环境, 减小外界热源对冷屏和磁体的热负荷。因此, 外真空杜瓦的可靠性是装置能否正常运行的关键部件, 基于数字化三维设计软件 CATIA V5 和 ANSYS 分析软件对其开展计算机仿真是必要的。

## 2 EAST 外真空杜瓦介绍

EAST 装置外真空杜瓦也是主机与多种辅助设备和诊断装置的连接界面, 为便于加工制造和进行装置维护, 它被设计成上封盖、中筒和底座三

部分组成。因 304L 不锈钢具有较好的抗磁化性能和较低的出气率, 被用来作为外杜瓦的结构材料, 中筒和底座上的加强筋用来提高外真空杜瓦的强度和刚度, 为便于拆装, 三个部分的连接采用

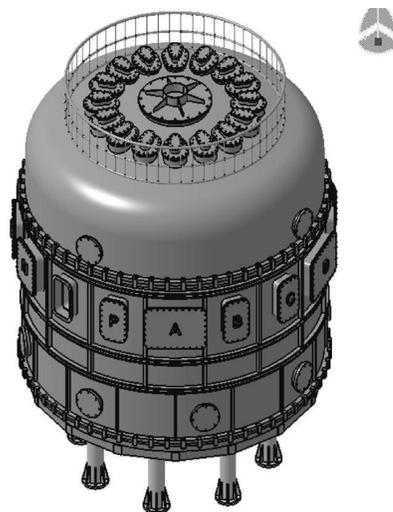


图 1 EAST 主机 3D 模型

Fig 1 3D model of EAST main machine

收稿日期: 2010-11-24

基金项目: EAST 核聚变装置国家大科学工程项目 (计投资 [1998] 1303); 安徽建筑工业学院硕博科研启动项目 (K02425)。

作者简介: 朱哲 (1965-), 男, 博士研究生, 从事核聚变实验装置的研究。

了卡箍结构。在结构尺寸上,外真空杜瓦壁厚 25mm,对称面处加强筋厚度为 40mm,杜瓦下部加强筋和底板厚度都为 60mm,见图 1。

### 3 EAST 外真空杜瓦协同仿真的研究

#### 3.1 CATIA 与 ANSYS 协同仿真的介绍

外真空杜瓦的底座固定在 EAST 装置主支撑结构上,如图 2 所示,它主要用来承担 EAST 装置中的真空室结构、冷屏支撑结构、冷质部件支撑结构以及杜瓦中筒和上封盖的重量,并用来连接主支撑,由于它本身具有较高的强度,本文只针对杜瓦的上封盖和中筒进行研究。

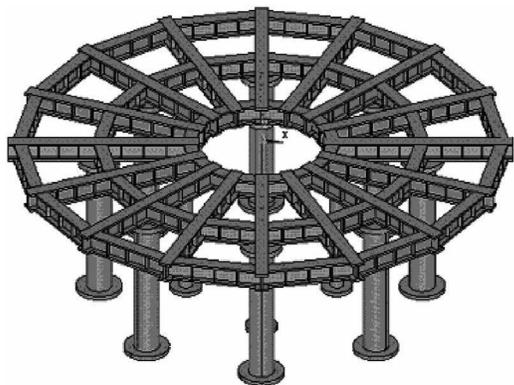


图 2 EAST 主机主支撑

Fig 2 The main support of EAST main machine

与普通的外真空杜瓦相比, EAST 外真空杜瓦在每一部分上面都开有特殊用途的窗口,从而削弱了它的结构强度和稳定性。由于结构的复杂性,借助经典公式难以对其进行结构的优化,为此,本文采用数字化三维设计软件 CATIA V5 R19 与大型有限元分析软件 ANSYS 12.0 进行 EAST 外真空杜瓦协同仿真技术的研究,旨在探索高效、高可靠性的核聚变实验装置外真空杜瓦研发的新思路<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 基于空间坐标的数字化三维建模

对于零部件较多的复杂结构,采用自由建模的方式会对后期的装配造成很大的困难,时常会因查找一些小型零件或者结构相似件花费较多的时间,同时也可能出现装配错误,例如存在干涉等。如果将存在问题的模型导入 ANSYS 等有限元软件进行分析,模型的修改会相当困难,由此引起的模型信息丢失更会导致分析结果失真。

为解决以上问题,需要在设计阶段确定整个

模型的坐标原点,为此,把杜瓦底座的中心定义为坐标原点,模型的建立均以杜瓦中心为参考,在上封盖和中筒下平面均建立有辅助平面,建模流程如图 3 所示,图 4 是通过这种方法建立的外真空杜瓦上封盖的三维模型。

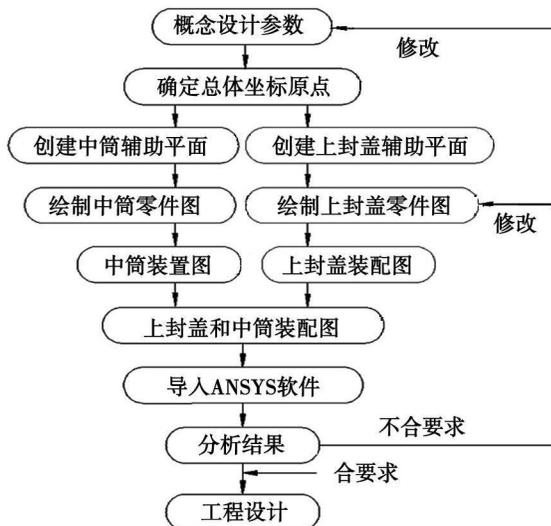


图 3 外杜瓦建模流程图

Fig 3 Flow chart of building 3D model for cryostat

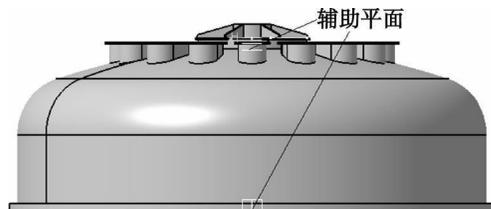


图 4 外杜瓦三维模型的辅助平面

Fig 4 Auxiliary planes of 3D model for the cryostat

#### 3.3 基于实体和抽取中面的模型处理

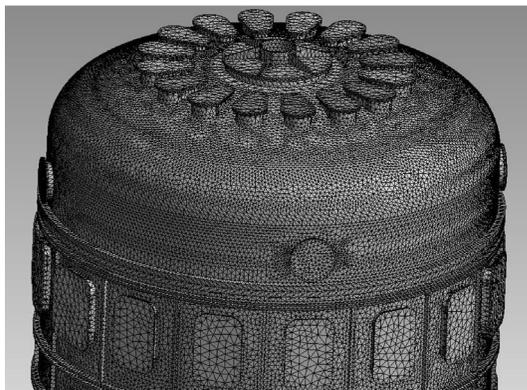


图 5 外杜瓦有限元模型

Fig 5 The finite element model of cryostat

在 ANSYS12.0 软件的经典界面中,对来自 CATIA V5 的三维模型可以采用实体单元进行求解,但对于 EAST 外真空杜瓦这样开有多个窗口的复杂形体很难划分出高质量的单元,为此,可通

过 ANSYS12 0 的 workbench 对模型进行单元划分并在经典界面中进行求解。这种模型处理方法通常会产生较多的单元和节点,如图 5,因此,本次针对实体模型的分析采用了高性能的 HP 图形工作站。

采用抽取中面的方法进行模型处理有很多种方法,当然所要处理的模型必须复合壳单元运算的要求,对于厚度差别不大、符合壳单元定义的实体模型,可以通过在 ANSYS 的经典界面中删除体的方法得到面,经过修整后再按壳单元进行分析<sup>[10]</sup>;而对于形状比较规则的实体单元,也可以在 CATIA V5 中采取 "面偏移" 的方法提取中面;另外,采用类似 Hypemesh 的专业前处理软件进行复杂模型的单元划分,或者通过抽取中面的方法转移到 ANSYS 壳单元中进行计算,如图 6 所示,以进一步提高分析的效率和分析结果的精度。

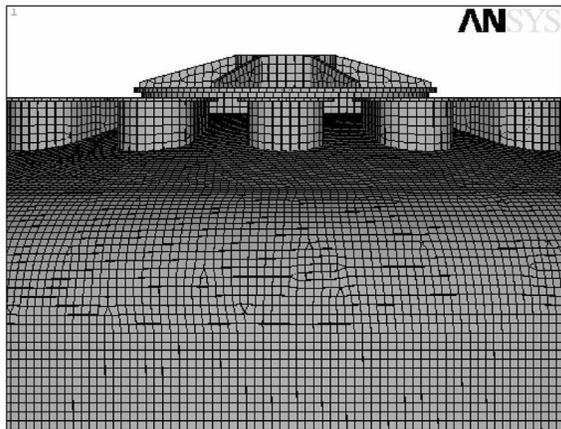


图 6 外杜瓦壳单元

Fig 6 Shell elements of cryostat

#### 4 EAST 外真空杜瓦协同仿真的分析

以现有的 CATIA V5 R19 和 ANSYS12 0 为协同仿真的工具软件,以 HP Z800 高性能图形工作站为硬件平台,它具有 2 颗四核心的 Xeon 3 2G 处理器,64G DDR 内存,4G 显存的高性能显卡,600G 的高速热插拔硬盘。安装的 Windows XP 64bits 系统可以实现对大内存的支持,以及多处理器的并行计算功能,将建立完成的模型导入 ANSYS12 0 软件,共得到单元 420523 个,节点 676011 个。

由于外杜瓦在工作过程中内部为真空,外部是室温环境,因此,对杜瓦模型外表面施加 1 个大

气压和重力载荷,并对杜瓦中筒的下底面施加全约束。分析结果如图 7 图 8 所示,图 7 是杜瓦上封盖和中筒整体模型的变形云图,最大变形 5 14mm,位于杜瓦上盖的顶部,根据材料力学关于压力容器计算的相关公式,圆筒横截面和球形壳体的应力  $\sigma_1$  如式 (1),而圆筒纵向截面的应力  $\sigma_2$  如式 (2):

$$\sigma_1 = \frac{pD}{4t} \tag{1}$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2t} \tag{2}$$

式 (1)、式 (2)中,  $p$ : 圆筒内的压力;  $D$ : 圆筒直径;  $t$  圆筒壁厚。因此,对于上封盖,当  $p$  和  $t$  一定时,采用圆形结构比平板结构产生的应力小。

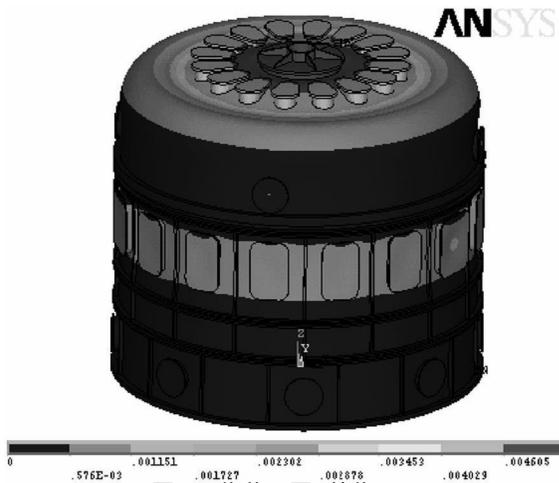


图 7 位移云图 (单位: m)

Fig 7 Displacements

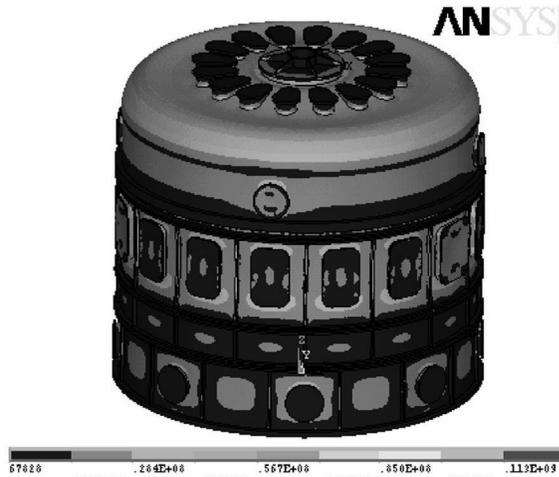


图 8 应力云图 (单位: Pa)

Fig 8 Stress intensity

图 8 是杜瓦上封盖和中筒整体模型的应力云图,最大应力 12MPa,小于常温下 304L 不锈钢的

许用应力 14MPa, 此结果表明开窗口部位存在应力集中; 在杜瓦的中筒上, 开窗口部位也存在应力集中, 并且窗口盖板的变形也比较大, 其主要原因是平面结构在有压力差的环境中产生较大的弯曲变形, 同时也容易产生较大的应力集中。因此, 中筒窗口上的平面盖板应适当增加厚度。

EAST 装置外真空杜瓦由上海锅炉厂制造, 为避免运输及工作时发生共振, 对其进行模态分析确定其固有频率是必要的<sup>[11]</sup>。表 1 是杜瓦上封头和中筒装配模型的前四阶模态分析结果, 一阶模态对应的变形云图如图 9 所示, 四阶模态对应的变形云图如图 10 所示。

表 1 杜瓦模态分析结果

Tab 1 Modal analysis results of cryostat

阶数	频率	阶数	频率
1	6.8867	3	6.9701
2	6.9587	4	7.0021

NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
FREQ=6.887  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.00171  
SMX =.00171

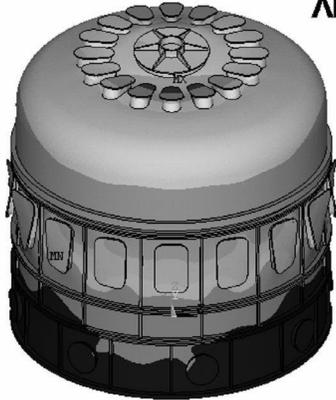


图 9 一阶模态变形云图

Fig 9 The displacement of first-order modal

从图 11 可知, 为防止杜瓦在固有频率附近因共振引起损坏, 采取了施加预应力的辅助措施, 并且采取水路运输的方式替代传统陆路运输, 确保杜瓦在运输和吊装过程中的安全。

与 EAST 装置正式投入运行后外真空杜瓦的实验结果相比, 在上封盖与中环体装配结合面的变形存在一定的误差, 测量结果显示该处的变形约为 2mm, 而分析结果约为 1.2mm, 误差产生的原因是结合面采用了粘结的布尔运算, 而实际上的结合方式是通过卡箍实现的, 这种连接的刚性小于整体式的结构。多轮的实验结果表明, 外真空杜瓦的强度是足够的。

NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =4  
FREQ=7.002  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.003719  
SMX =.003719



图 10 四阶模态变形云图

Fig 10 The displacement of fourth-order modal



图 11 EAST 装置外真空杜瓦吊装

Fig 11 Hoisting and installation of the cryostat for EAST

## 5 结束语

通过对 EAST 外真空杜瓦进行的协同仿真技术的研究, 提出了提高分析速度, 改进分析精度的可行方法, 针对实体单元模型进行的分析所得结果合理, 为同类装置外真空杜瓦的快速优化设计提供了有益的参考。

## 参考文献

[1] 朱银锋, 吴维越, 武松涛, 等. 反质子和离子加速器收集环的超导二极磁体设计 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2008 28(2): 163.  
[2] 郑德春, 姚庆栋, 刘鹏. 基于软硬件协同仿真平台的功能仿真测试方法 [J]. 电路与系统学报, 2008 13(2): 133.

(下转 29 页)

ANSYS有限元分析软件进行数值模拟。模拟过程中选用梁单元,完全按照上例中的形状尺寸进行建模。为便于比较 A 点处的应变变量,建模时取  $S_1 S_0$  平行于 x 轴,这样计算出的 x 轴方向的应变就是该处的轴向应变。定义材料的性能参数时,将线膨胀系数设为恒定值  $1.91 \times 10^{-5} K^{-1}$ 。分别将材料的弹性模量设为 60GPa、100GPa 和 200GPa 进行多次分析,以验证结构的应变分布是否与材料的弹性模量无关。为了对应上面的分析及 S 弯的工作状态,加载时初始温度设为 294.5K,温度载荷为 4.5K,并对模型两端做全固定<sup>[4]</sup>。

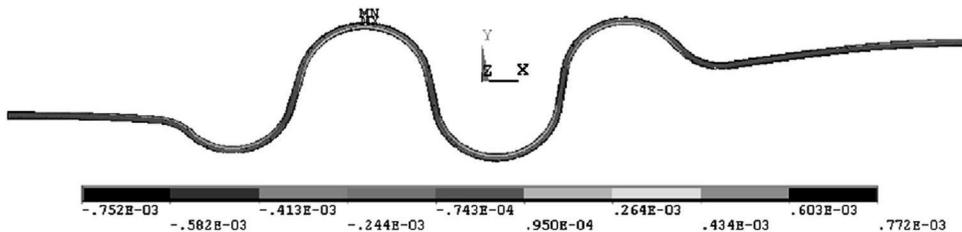


图 2 应变分布图

Fig 2 Strain distribution

## 4 结论

本文基于温度变化时材料的自由变形和卡氏定理,分析了 S 弯结构在两端全固定时的热应变分布。并以一条 S 弯为例,解出其最大应变和最小应变出现的位置及具体数值。计算过程中还发现结构的热应变分布与材料的弹性模量无关。之后采用 ANSYS 有限元进行同等情况下的模拟,两者非常吻合。由此可以认为,运用该方法计算出的结果具有较高的准确度,这为计算类似结构的应变分布提供了理论依据。由于材料在弹性范围内工作,

通过计算机模拟,对于材料弹性模量的不同设置,其应变分布完全相同,由此证明结构的应变分布确实与材料的弹性模量无关。

S 弯结构在 x 轴方向上的应变分布如图 2 所示,从图上可以看出,对应于图 1 的 A 点处确实出现了该结构的最大应变和最小应变,它们分别位于圆弧段的外侧和内侧,这与理论分析出的结果完全吻合。数值模拟出的最大应变和最小应变分别为  $772 \mu\epsilon$  和  $-752 \mu\epsilon$  这与前面的计算结果也是吻合的。

通过胡克定律可以准确获得结构上的应力分布。

## 参考文献

- [1] 王建青,宋云涛,武松涛,等. ITER 磁体过渡馈线的结构设计及优化[J]. 核技术, 2006, 29(4): 271-275
- [2] 苏翼林. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
- [3] 田蔚. 材料物理性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [4] 朱立伟,柳建华,张良,等. LNG 船用超低温球阀的低温应力分析及数值模拟[J]. 低温与超导, 2010, 38(5): 11-14.
- [5] 朱银锋,武松涛,吴维越,等. FAIR 收集环超导二极磁体支撑设计与热负荷分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(3): 218.
- [6] 马迅,田荣. 基于协同仿真环境的驱动桥壳有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2007, 21(9): 69.
- [7] 朱银锋,吴维越. FAIR 收集环二极超导实验磁体的研究[J]. 低温与超导, 2008, 38(4): 39.
- [8] 谢韩,廖子英. EAST 托卡马克装置外冷屏的热负荷分析[J]. 低温与超导, 2004, 32(1): 59.
- [9] 朱银锋,武松涛,毕延芳,等. EAST 纵场磁体系统 16kA 高温超导电流引线的研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2007, 27(7): 101.
- [10] 潘皖江,武松涛,陈先忠,等. EAST 超导托卡马克装置主机支撑结构极低温条件下应力应变分析[J]. 低温与超导, 2005, 33(3): 29.
- [11] 范庆明,刘红军. 支持航空发动机设计复杂产品协同仿真系统的研究[J]. 机械设计与制造, 2008(8): 91.
- [12] 朱银锋. FAIR 收集环二极超导磁体外杜瓦泄放系统的概念设计[J]. 低温与超导, 2009, 37(1): 29-32.
- [13] 盛道林,武松涛,朱银锋. EAST 外杜瓦系统泄放装置的设计与实验研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(7): 885.

(上接 11 页)