

# 有限元在杆式支撑结构力学分析中的应用

陈先忠 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 介绍有限元分析软件 ANSYS 在一种杆式支撑结构设计中的应用,通过模拟各种载荷工况对结构的影响分析,对 HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构初步设计方案做进一步的优化和完善。

**关键词** 有限元分析, 载荷工况, 杆式支撑结构

**中图分类号** TL631.2<sup>+</sup>4, TH123<sup>+</sup>3, TB115

有限元方法是结构分析中的一种数值法,它已成为分析连续体的强有力的工具。有限元方法在数学上是指求解偏微分方程的一种数值方法,在力学上则是指求解连续介质力学的一种离散方法。有限元方法的计算精确度取决于计算模型中所选用单元的质量、求解控制方程的精确度、以及离散化的方式。而有限元方法的计算准确度则依赖于计算模型的物理特性(包括加载方式、边界条件等)逼近真实结构物理特性的程度。因此,建立正确合理的计算模型是求解任何工程问题时必须解决好的首要任务。

HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构的方案之一(如图 1 所示)是一个复杂的杆系组合结构,它是由多根圆杆穿插而成。对于这种新型支撑结构,精确计算其在各种载荷工况下的应力分布规律及其变形情况,对准确确定支撑结构的实际承载能力和使用寿命,以及改进现有支撑结构,都有重要的现实意义。



图 1 支撑结构模型  
Fig.1 Support model

## 1 支撑结构力学模型

整个冷质部件支撑系统是由 16 个单个支撑结构均布在半径为 2295 mm 的圆上。在运行前支撑

系统主要承受的是纵场系统、极向场系统及其附件的重量,总质量约 200 t;而在稳定运行时,除了冷质部件的重量外,还有电磁力及纵场由室温到低温状态的热收缩力;根据纵场分析结果,它由室温冷却到液氮温度过程中要向中心收缩约 6.7 mm。对于支撑结构的有限元模型建立的难点在于:第一,由于圆杆是细长杆,如果仅对杆件进行建模,则作用在杆件两端的载荷和约束不便处理;第二,如果对支撑结构进行实体建模,会使单元数量大大增加而影响计算速度,而且对计算机的性能要求也大大提高,若进行简化则势必影响计算精度。根据支撑结构的对称性,我们取 1/16 为研究对象,即单个支撑结构进行网格划分和加载计算。

### 1.1 模型的建立

考虑到底座的刚性要远大于杆件的刚性,支撑结构上的最大应力点只可能发生在杆件上或杆与刚性板的连接处,因此支撑结构的力学模型包括 3 组拉压杆和刚性连接板,分别采用六面体和四面体单元分别对模型的杆件和板件进行三维实体网格划分。支撑结构的网格模型如图 2,支撑结构的材料为 316LN。

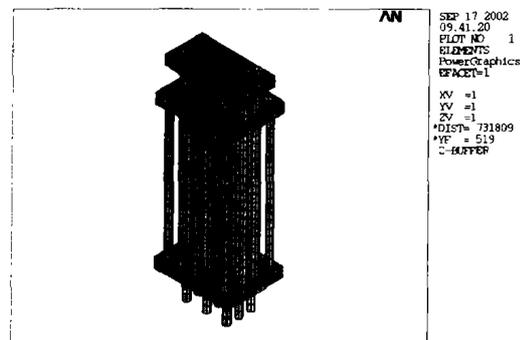


图 2 有限元网格

Fig.2 Finite element mesh

### 1.2 载荷工况

根据支撑结构和材料的非线性特点以及支撑结构上的温度分布的不均匀性, 首先将温度作为载荷工况。底端温度为室温, 取 300 K, 顶端取 4.5 K, 计算支撑结构的温度分布; 再将温度分布计算结果作为载荷施加在结构模型上。冷质部件的重量可以看成均布的面力作用, 它在低温下的热收缩力的大小由支撑结构的刚性决定。由于它的热收缩变形已通过计算算出, 所以可以通过在支撑结构的顶板侧面施加不同大小的力使顶端的位移达到约 6.7 mm, 这时支撑结构上的应力分布就是所求的结果。

### 2 应力及位移分布计算结果

(1) 在只有温度作用下的应力及位移分布如图 3。

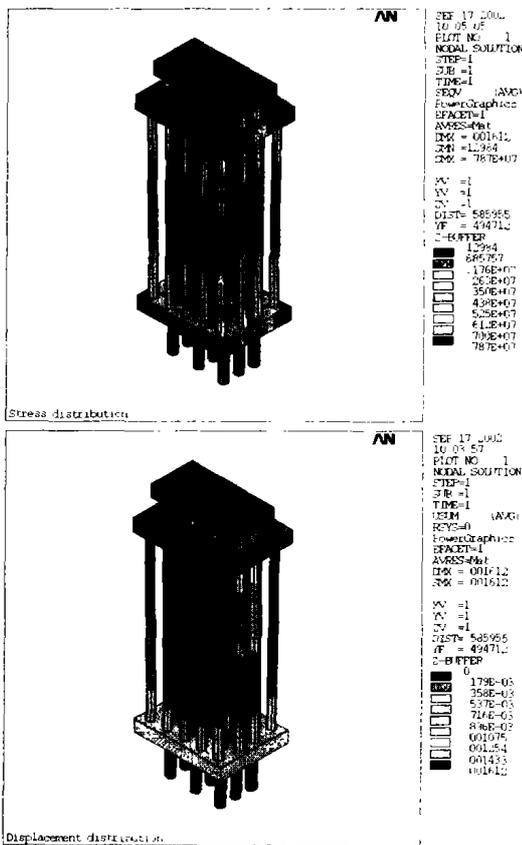


图 3 在温度作用下的应力及位移分布

Fig.3 The distributions of stress and displacement under temperature field

从应力及位移分布图中可以看出, 该结构的最大应力只有 7.87 MPa, 因此对于该支撑结构来讲, 热应力的影响是很小的。支撑结构本身的热收缩的最大位移有 1.6 mm。

(2) 在温度和冷质部件作用下的应力及位移分布如图 4。

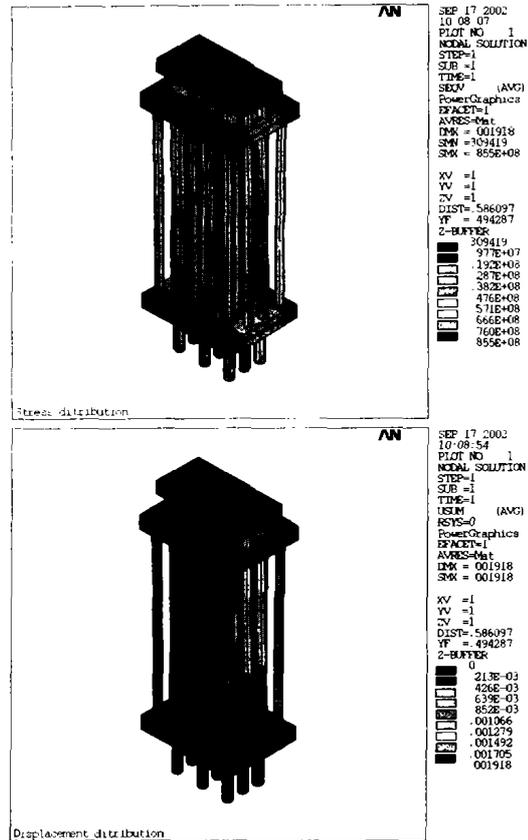


图 4 在温度和重力作用下的应力及位移分布

Fig.4 The distributions of stress and displacement under temperature field and weight of cryogenic components

当有重力的作用时, 该支撑结构上的最大应力为 85.5 MPa, 但最大应力发生在连接板的薄弱处, 位移的影响还是由于温度引起的, 最大位移只有 1.9 mm。

(3) 以下是根据不同水平侧向力计算的结果 (如表 1), 图 5 为侧向力为 2940N 时的应力及位移分布图。

表 1 在不同水平力作用下的应力和位移大小

Table 1 Stress and displacement under different horizontal forces

侧向力 Horizontal force / N	最大应力 Maximum stress / MPa	水平位移 Horizontal displacement / mm	垂直位移 Vertical displacement / mm
1960	86	4.42	1.94
2940	90.8	6.5	1.98
3920	111	8.59	2.03
4900	131	10.67	2.07

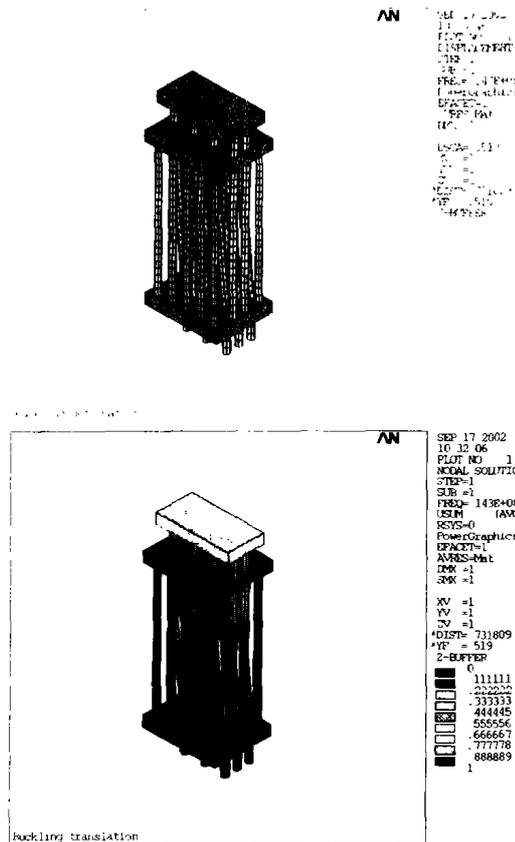
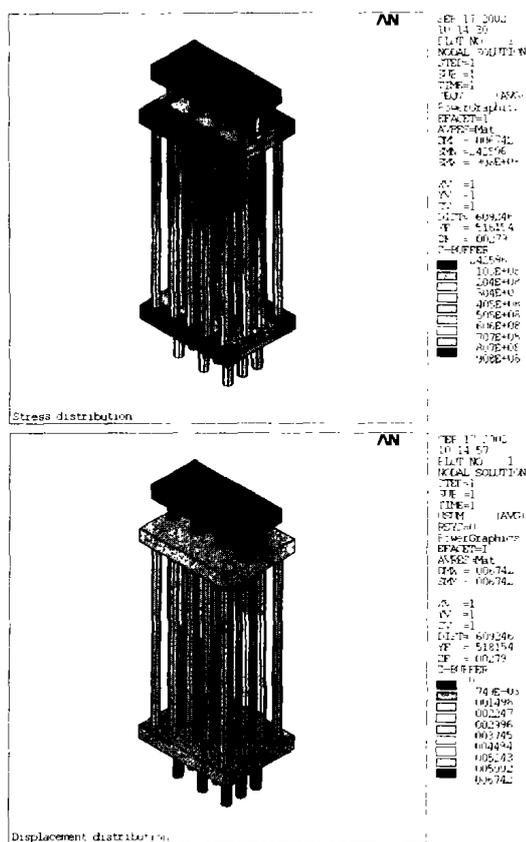


图 5 在温度、重力以及 3000 N 水平作用下的应力及位移分布

图 6 结构屈曲形式

Fig.5 The distributions of stress and displacement under temperature field, weight of cryogenic components and 3000N of horizontal force

Fig.6 The buckling analysis

当有侧向水平力时，最大应力位置在杆件上，而且最大应力与该力的大小成线性关系，侧向力在约 3000N 时，就可以使水平位移达到 6.5 mm，接近冷质部件收缩的 6.7mm，而最大应力只有 90.8 MPa，从强度方面考虑该支撑结构是满足要求的。

### 3 稳定性计算

由于该支撑结构采用的是圆杆式悬挂结构，部分杆件承受的是压力作用。细长压杆丧失工作能力，往往不是因为强度不够，而是因为圆杆丧失直线形式的破坏，要保证支撑结构的正常工作，除了满足强度、刚度条件外，还要满足稳定性要求。对于单根压杆可以由材料力学计算其临界力的大小，而对于这种多杆结构，由于每组压杆的约束条件不同，能承受的临界力大小也不一样，图 6 是有限元软件 ANSYS 计算的结果，在支撑结构的底端固定约束，顶端施加均布载荷时，可以承受 92.6t 的压力作用，即在外载荷超过该值时，下面的一组压杆将丧失直线平衡形式而破坏，支撑向刚性较弱的方向倾斜。

## 4 结果分析

从支撑结构的力学计算结果来看，该结构是满足要求的。该结构所采取的形式是为了降低支撑对冷质部件的热负荷，因为支撑结构的圆杆越长，传热路径越长，这样传到冷质部件的热量就越少。而且，杆件越长，在相同的顶端位移下，杆件上的应力就越小，对强度设计是有利的。但从压杆的稳定性上考虑，应该是杆件越短，结构越稳定。以下是根据支撑结构的分析结果提出的一些改进意见：结构的设计过程中，对压杆首先考虑的应该是稳定性要求，对于 3 组杆件中的 2 组压杆，可以将杆件直径加大，长度缩短，这样有利于提高结构的稳定性。由于这 2 组压杆的边界约束条件不同，相同长度的单根压杆能承受的临界力的大小也不等，而且下面一组压杆比上面一组压杆的数量多，为了充分发挥两组压杆的承压作用，可以调节两组压杆的直径和长度，以达到优化的效果。而另外一组为拉杆，不存在失稳现象，可以减小直径，使最大应力分布在拉杆上，同样达到结构的柔性要求。当然杆件的这些尺寸参数还要通过具体的计算来确定。

在支撑结构的设计和分析过程中，我们主要以

有限元分析软件 ANSYS 为工具, 以可视化的方式显示结构在各种载荷作用下的应力、位移分布和失稳破坏形式。这样的做法尤其是在优化结构参数的过程中, 起了非常大的作用, 大大节省了设计人员的时间和精力。

### 参考文献

- 1 WU S T, Weng P D. The Project of HT-7U and its Progress, presented at MT-15, Beijing, 1997, Oct. 20-24
- 2 陈先忠, 武松涛. 机械设计, 2002, 5: 30—31
- 3 CHEN Xianzhong, WU Songtao. Journal of Machine Design, 2002, 5: 30—31
- 3 Yu J, Pan Y N. Finite element analysis on the HT-7U TF coil case, Symposium of the HT-7U Design, ASIPP, Jan, 1998, China
- 4 张允真, 曹富新. 弹性力学及其有限元法, 北京: 中国铁道出版社, 1988
- 4 ZHANG Yunzhen, CAO Fuxin. Elastic Mechanics and Finite Element Method, 1988

## Application of finite element to the analysis of the bacilliform support structure

CHEN Xianzhong WU Songtao

*(Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)*

**Abstract** The action of the shaft support structure under multi-load condition is studied by the ANSYS code in this paper. The research aims at optimizing the parameters of the support structure of HT-7U Tokamak.

**Key words** Finite element analysis, Load condition, Bacilliform support structure

**CLC** TL631.2<sup>+</sup>4, TH123<sup>+</sup>.3, TB115