

# HT-7U 超导托卡马克纵场磁体系统的力学分析

阮剑华<sup>1</sup>, 张培强<sup>1</sup>, 陈文革<sup>2</sup>, 武松涛<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学力学与机械工程系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** HT-7U 超导托卡马克装置的纵场线圈是整个装置的核心部件, 结构复杂. 对整个线圈直接进行实验是极其困难的, 有必要在设计阶段对其在液氮工作温区的力学性能进行有限元分析计算. 对纵场线圈进行了一些简化, 主要对纵场磁体系统在面内电动力作用下的应力分布进行了有限元分析计算, 这些计算结果为线圈的设计和改进行提供了一定的参考依据.

**关键词:** HT-7U; 纵场磁体系统; 有限元

**中图分类号:** TL62<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A

## 0 引言

超导托卡马克装置 HT-7U 是一种稳态先进运行模式的核聚变装置, 它的建设和研究计划受到了国内外核聚变界的高度关注. 超导纵场磁体结构系统, 是 HT-7U 装置的核心部分, 为了保证纵场磁体系统结构的安全性和可靠性, 有必要在设计阶段对其进行各种复杂工况的应力校核和优化设计. 国外一些超导托卡马克装置(如 T-15、KSTAR、SST-1、ITER 等)在设计阶段都对力学性能进行了有限元分析, 并作为设计的重要依据<sup>[1]</sup>. 文献[2]对纵场磁体系统开展了相应的力学分析, 但采用的分析模型为单个独立的“D”型线圈, 边界条件给定为两个侧面上法向约束. 这种分析模型边界条件不够合理, 因为在“D”型线圈两侧存在相互挤压, 法向位移并不为零; 另外原有模型中超导线圈等效为各向同性材料也不够合理; 同时原有工作电磁和结构是采用不同的软件分开独立分析, 这样也会造成结构分析时电动力载荷施加的不够精确. 我们修正了以上几点, 对纵场磁体系统进行了更加准确的力学分析, 并且对“D”型线圈间由于挤压而产生的摩擦对结构的影响也进行了初步的分析.

## 1 HT-7U 纵场磁体系统简介

HT-7U 纵场磁体系统是 HT-7U 装置的核心部件, 由十六个“D”型超导线圈沿环向均

收稿日期: 2003-02-17; 修回日期: 2004-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19732001).

作者简介: 阮剑华, 男, 1976 年生, 博士. 研究方向: 结构力学分析.

布排列组成. 线圈采用五段圆弧和一段直线段组成的近似 D 形结构(见图 1). 纵场磁体系统的支撑方式为: 纵场线圈盒体直线段相互挤紧形成内拱, 用以承受纵场磁体系统受到的强大向心力(即面内电动力); 由上下环向楔型结构中的销键来承受由面外电动力产生的倾覆力矩. 此外装置总体结构设计中, 作为极向场系统的支撑结构, 纵场线圈盒及其外侧环向楔型支撑设计为筋板加强箱式结构. 纵场线圈的垂直高度为 3.634 m, 径向宽度为 2.609 2 m, 环向宽度为 0.347 4 m. 线圈盒体采用低温下高强度的不锈钢 316LN 板材焊接而成, 整个纵场超导磁体结构系统的重量(包括极向场系统)通过其重力支撑结构将重力传递到外真空杜瓦上, 并通过相应的结构传递到地面上.

HT-7U 纵场超导线圈采用 CICC(cable-in-conduit conductor)导体<sup>[3]</sup>, 导体的尺寸为 20.4 mm×20.4 mm. 为了有效利用纵场线圈的截面面积, 同时也要保证超导磁体的稳定性能, 将纵场绕组的截面设计为 130 匝阶梯形绕组, 其截面尺寸为 254.7 mm×287.4 mm(含厚度为 8 mm 对地绝缘层), 纵场绕组绕制成形后放置于不锈钢的线圈盒体中, 经环氧树脂真空压力浸渍(VPI)与线圈盒体固化为整体结构.

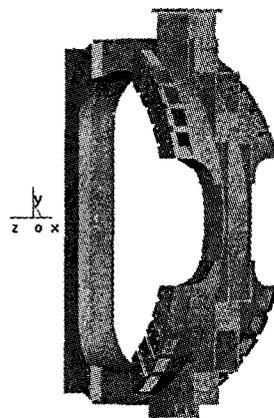


图 1 纵场超导磁体结构  
Fig. 1 Toroidal Field (TF) system of HT-7U

## 2 纵场磁体系统的力学分析

### 2.1 建模

纵场磁体系统结构复杂, 在建模时作了一些合理的简化, 主要简化有:

- (I) 把超导线圈简化为各向异性等效弹性体;
- (II) 把超导线圈和线圈盒体简化为完全固结;
- (III) 纵场磁体的环向楔型支撑为箱体式结构, 在模型中简化为实体;
- (IV) 对地支撑结构较为复杂, 模型中只考虑对地支撑固接在磁体结构上的部分.

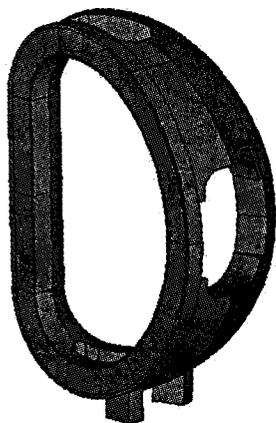


图 2 纵场超导磁体有限元  
计算模型

Fig. 2 FE model of TF system

在实际建模中考虑到磁体系统为 16 个“D”型超导线圈沿环向均布而成, 在有限元建模时只建立了 1/16 的模型, 本文 1/16 模型的选取有别于以前的工作, 选用两个相邻的“D”型线圈的一半组成, 边界为“D”型线圈的中面, 模型如图 2 所示. 约束条件为在两“D”型线圈中面上施加法向位移约束, 这种边界条件的施加更加合理, 同时这种模型更方便于分析“D”型线圈间挤压面的情况. 为了建模简洁和便于网格划分, 模型中忽略了影响很小的极向场支撑系统. 为了进行

比较, 本文把“D”型线圈之间的接触面按两种情况处理: (1) 接触面完全粘结, 称为线性模型; (2) 挤压接触面上存在摩擦, 称为非线性模型.

## 2.2 载荷

纵场磁体系统受到的载荷较为复杂,包括(1)重力载荷;(2)由降温和各部件温度不均引起的热载;(3)电动力载荷,包括纵场磁体自身电流与自场相互作用产生的面内电动荷载,以及与极向场磁场相互作用所产生的面外电动荷载(亦称倾覆力);(4)系统非正常运行产生的各种载荷等.其中面内电动力作用最大,本文重点分析系统正常运行时受面内电动力载荷作用下的结构受力情况,采用 ansys 多场联合求解技术,先计算了整个磁体系统的磁场分布,得到的电动力在结构分析中直接施加在单元各个结点上.以前的工作载荷分析采用一种软件而结构分析采用另一种软件,载荷采用分段施加等效集中力的办法来实现,本文载荷的施加无疑比以前更精确.

## 2.3 材料参数

纵场磁体系统主要由纵场超导线圈和线圈盒体组成,线圈盒体为 316LN 不锈钢材料,超导线圈结构复杂,由 CICC 导体(由 NbTi 和 Cu 经过多级绞制而成,并穿入 316LN 不锈钢方管中形成全导体结构)绕制并缠绕玻璃纤维布,再用环氧树脂经过真空压力浸制而成.超导线圈结构各个方向上的性质是不同的,原有工作为了分析方便,把超导线圈等效为各向同性材料,并采用复合材料的混合率计算其等效材料参数.本文把超导线圈等效为各向异性材料,采用均匀化方法(homogenization)对其材料参数进行了等效分析<sup>[4~5]</sup>,较为准确的得到了超导线圈的等效材料参数.表 1 给出了液氮温度下 316LN 不锈钢的材料参数和均匀化方法计算得到的超导线圈的等效材料参数.

表 1 纵场磁体系统模型材料参数

Tab. 1 Parameter of materials of TF system

	材料参数/GPa								
	$E_x$	$E_y$	$E_z$	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{zx}$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{zx}$
316LN 不锈钢	207	207	207	0.272	0.272	0.272	81.3	81.3	81.3
等效超导线圈	36.466	49.578	29.051	0.2525	0.2376	0.0733	6.904	12.405	14.728

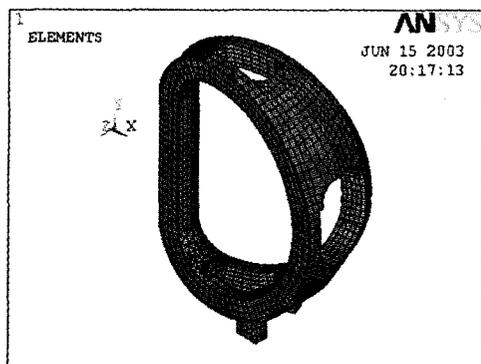


图 3 纵场磁体系统模型网格划分图

Fig. 3 Mesh of the TF system FE model

## 2.4 有限元计算结果

### 2.4.1 线性模型计算结果

本模型未考虑“D”型线圈盒体接触面上的摩擦,认为是完全固结.使用 ansys 软件分析,模型采用 solid95 单元进行网格划分,网格划分如图 3 所示.面内电动力载荷作用下结构应力分布见图 4,整个结构最大 Von Mises 应力为 421 MPa,发生在第一弧线段和楔型块连接处,由图 4 可以看出应力主要集中在直线段,其中直线段鼻端承受较大的应力,这跟设计思想一致,另外与直线段相连的两弧线段也承受着较大的应力,而环向支撑结构应力很小.图 5 为超导线圈的应力分布图,超导线圈最大 Von Mises 应力为 56.8 MPa,发

生在与直线段相连的弧线段上。

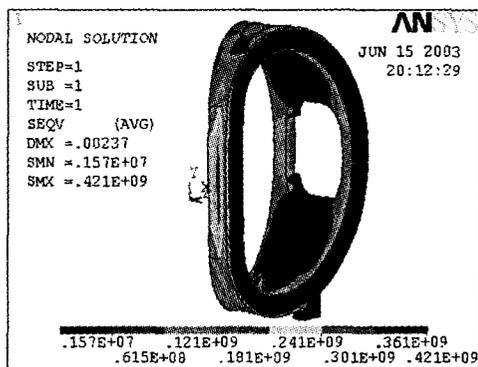


图 4 纵场磁体系统线性模型应力分布图

Fig. 4 Stress distribution of TF system of linear model

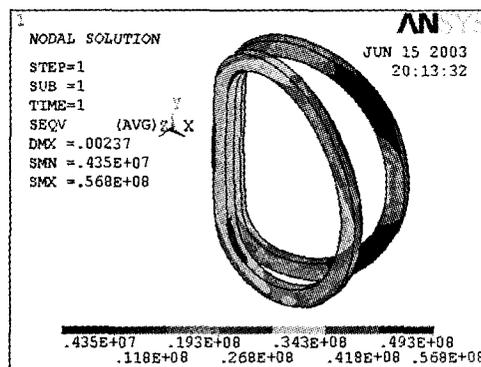


图 5 纵场磁体系统等效超导线圈应力分布图

Fig. 5 Stress distribution of effective coils of TF system

#### 2.4.2 非线性模型计算结果

非线性模型考虑了两“D”型结构间接触面的摩擦,更加复合实际情况,但计算量也相应的增大了很多.本文在两“D”型结构接触面上采用了面-面接触模型,接触单元的材料性能与 316LN 不锈钢相同,由于实际摩擦系数( $\mu$ )未知,本文选摩擦系数为 0.2 为例进行结构分析,并与完全固结的线性模型计算结果比较,讨论接触面摩擦对结构的影响,同时对摩擦系数从 0.1 变化到 0.3 的情况下接触面上的接触情况也进行了分析.

图 6 为结构在考虑了接触面上摩擦后的应力分布图(摩擦系数 0.2),从图中可以看出结构所受的最大 Von Mises 应力变为 423 MPa,同线性模型计算结果比较发现,结构受接触面摩擦的影响很小,但最大应力产生的地方发生了变化,此时最大应力发生在直线段上.等效超导线圈的应力分布如图 7 所示,最大应力也略有增大,从 56.8 MPa 变化到 57.7 MPa,但分布情况基本相同.

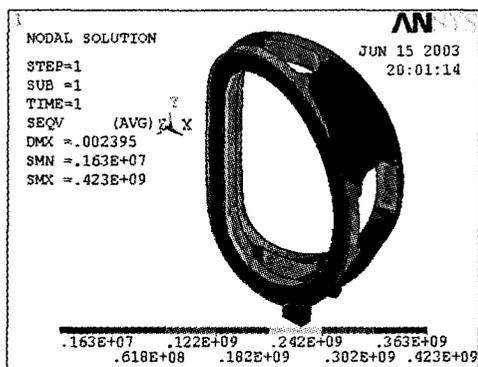


图 6 纵场磁体系统非线性模型的应力分布图( $\mu=0.2$ )

Fig. 6 Stress distribution of TF system of non-linear model ( $\mu=0.2$ )

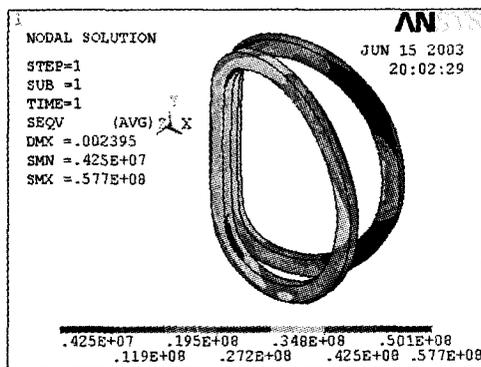


图 7 纵场磁体系统等效超导线圈非线性模型的应力分布图( $\mu=0.2$ )

Fig. 7 Stress distribution of effective coils of non-linear model ( $\mu=0.2$ )

本文也对摩擦系数对接触面的影响进行了分析,图 8 是摩擦系数为 0.1,0.2 和 0.3 时接触面脱离、滑移和粘合的分布情况,从图中可以看出,随着摩擦系数的增大,粘合区的面积也随着增大(面-面接触,ansys 里定义:stat=1 为脱离;stat=2 为滑移;stat=3 为粘合)。

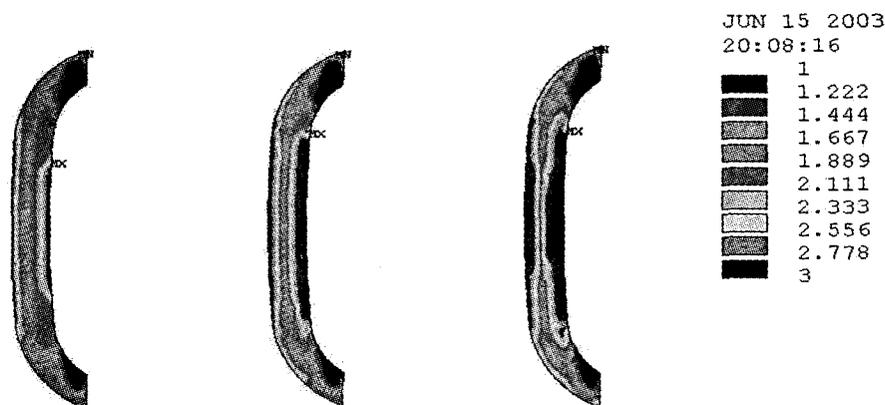


图 8 从左向右分别是摩擦系数为 0.1,0.2 和 0.3 时非线性模型接触面的变化情况

Fig. 8 The change of contact areas in non-linear model  
(from left to right the friction coefficient is 0.1,0.2 and 0.3)

### 3 讨论

本文改进了分析模型,通过对纵场磁体系统线性和非线性改进模型的有限元分析,纵场磁体系统的结构设计是合理的,整个结构最大 Von Mises 应力为 420 MPa 左右,发生在线圈箱体上,远未超出 316LN 不锈钢在液氮温度下的屈服强度(800 MPa). 这些分析工作对整个 HT-7U 超导装置的建设具有极其重要的作用. 但本文只是对电力载荷进行了分析,对于多种载荷同时施加情况还需进一步分析;对接触面上的分析也是初步的,对接触面上摩擦系数的确定等工作都有待于进一步展开.

#### 参 考 文 献

- [1] Kaminski M, Schrefler B A. Probabilistic effective characteristics of cables for superconducting coils[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2000, 188: 1-16.
- [2] 郁杰. HT-7U 超导托卡马克装置 CICC 纵场试验线圈的研制[D]. 合肥:中科院等离子体物理研究所, 1999.
- [3] 陈文革. HT-7U 超导托卡马克核聚变装置纵场磁体结构的设计分析与磁体实验研究[D]. 合肥:中科院等离子体物理研究所, 2002.
- [4] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization I -homogenization theory for media with periodic structure[J]. Computers and Structures, 1998, 69:707-717.
- [5] Hassani B, Hinton E. A review of homogenization and topology optimization II -analytical and numerical solution of homogenization equations [J]. Computers and Structures, 1998, 69:719-738.

## FE Stress Analysis of Toroidal Field Magnet System in HT-7U

RUAN Jian-hua<sup>1</sup>, ZHANG Pei-qiang<sup>1</sup>, CHEN Wen-ge<sup>2</sup>, WU Song-tao<sup>2</sup>

(1. CAS Key Lab of MBDM, Department of Modern Mechanics, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The super-conducting Toroidal Field (TF) coil system is a very important part of HT-7U superconducting tokamak device, which have rather complex structures. In order to design the mechanical structure of TF system, it is very necessary to analyses the mechanics characteristics at the working temperature (liquid helium temperature). The stress distribution of TF magnet system under electromagnetic force is analyzed by using finite element method. These results will help to analyse the mechanics behavior of HT-7U tokamak device.

**Key words:** HT-7U device; TF magnet system; finite element method