

Doi: 10.3969/j.issn.1003-5060.2010.11.032

# 基于 Ansys 的磁-结构耦合分析及应用

叶华华<sup>1</sup>, 刘正士<sup>1</sup>, 陈恩伟<sup>1</sup>, 程旺<sup>1</sup>, 杜世俊<sup>2</sup>, 吴维越<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 文章初步总结应用了 Ansys 的耦合分析方法, 重点研究了磁-结构耦合分析, 介绍了顺序耦合分析的 2 种分析方法并加以比较; 采用了顺序耦合分析方法中的间接法对某大型线圈进行磁-结构耦合分析, 以实例阐述了间接分析法的分析步骤, 讨论了在分析过程中应该注意的几个要点, 并且给出了分析结果, 为线圈的结构设计提供了参考。

**关键词:** 有限元分析; 耦合分析; 磁-结构耦合

中图分类号: TL622 文献标志码: A 文章编号: 1003-5060(2010)11-1733-05

## Analysis and application of magnetic-structural coupling based on Ansys

YE Huahua<sup>1</sup>, LIU Zhengshi<sup>1</sup>, CHEN Enwei<sup>1</sup>,  
CHENG Wang<sup>1</sup>, DU Shijun<sup>2</sup>, WU Weiyue<sup>2</sup>

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** This paper summarizes the coupling analytical methods with Ansys, especially studies the magnetic-structural coupling method, and introduces and compares two methods of sequential analysis. The magnetic-structural analysis of a big coil is conducted by indirect method of sequential analysis, and the analytical process of indirect method is illustrated by the example. Some key points are emphasized in the paper, and the analytical results are given, which can be a reference for structural design of coil.

**Key words:** finite element analysis; coupling analysis; magnetic structural coupling

随着现代科学的不断发展, 在同一工作环境中, 多个条件共同作用、相互制约的情况越来越多, 从而导致多场耦合问题在实际工程应用中更为普遍, 如热变形分析, 考虑热和结构的相互作用, 求解由于温度引起的结构变形。其它常见的耦合分析有磁-结构耦合分析、热-电耦合分析及流体-结构耦合分析等。

近年来, 核电的应用越来越广泛, 而在设计核电装置时, 必须考虑磁-结构的耦合问题。本文利用大型有限元分析软件 Ansys, 以实例介绍磁-结构耦合分析方法。

## 1 耦合分析方法

### 1.1 耦合分析方法比较

耦合场分析是指在有限元分析的过程中考虑了 2 种或者多种物理场的交叉作用和相互影响(耦合)<sup>[1]</sup>。耦合场分析的过程依赖于所耦合的物理场, 可以分为 2 类: 顺序耦合和直接耦合。顺序耦合方法包括 2 个或多个按一定顺序排列的分析, 每种分析在特定的物理场中进行, 通过将前一个分析的结果作为载荷施加到第 2 个分析中的方式进行耦合。直接耦合方法一般只涉及一次分

收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2009-12-23

作者简介: 叶华华(1982-), 男, 安徽歙县人, 合肥工业大学硕士生;

刘正士(1947-), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师;

杜世俊(1950-), 男, 安徽合肥人, 博士, 中国科学院等离子体物理研究所教授, 博士生导师。

析,利用包括所有必要自由度的耦合场类型单元,通过计算包含所需物理量的单元矩阵或载荷向量的方式进行耦合。顺序耦合方法通常应用于物理场间的相互作用非线性程度不是很高的情况,由于在每个物理场中相对独立的求解,因而效率更高,也更灵活。直接耦合方法在解决耦合场相互作用具有高度非线性时更具优势,并且可利用耦合公式一次性得到最好的计算结果。对于非线性程度不高的情况,若采用直接耦合方法则节点上自由度将增多,因而形成的单元矩阵和载荷向量将更为复杂,求解的方程组规模也就越庞大,故而效率不高,不够灵活,本文采用的磁-结构耦合分析是顺序耦合方法<sup>[2]</sup>。

### 1.2 磁-结构顺序耦合分析方法

顺序耦合场分析可使用物理环境法或间接法。对于物理环境法整个模型使用 1 个数据库,数据库中必须包含所有物理分析所需的节点和单元。对于每个单元或实体模型图元,必须定义一套属性编号,包括单元类型号、材料编号、实常数编号及单元坐标系编号。这些编号在所有物理分析中是不变的,但在每个物理环境中,每个编号对应的实际的属性是不同的,如实常数和单元类型。模型中的某一区域在某一个物理环境中,可以是无效的。对于间接方法,使用不同的数据库和结果文件,每个数据库包含合适的实体模型、单元和载荷等。可以把一个结果文件读入到另一个数据库中,但单元和节点编号在数据库和结果文件中必须是一致的。

磁-结构顺序耦合分析间接法与物理环境法数据流程图<sup>[3]</sup>,如图 1 和图 2 所示。

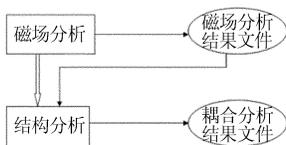


图 1 磁-结构耦合分析间接法流程

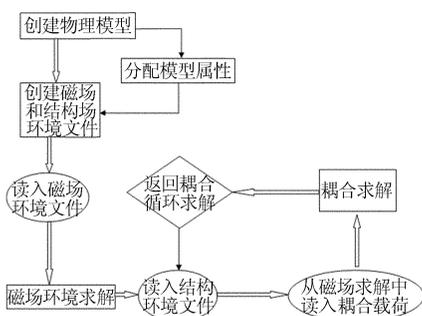


图 2 磁-结构耦合分析物理环境法流程

由图 1 和图 2 可以看出,间接法在耦合时把磁场分析结果文件导入结构场分析中,使用的是不同的数据库和结果文件;而在物理环境法中,需要先创建磁场分析和结构场分析环境文件,才能进行迭代耦合循环求解,故使用同一个数据库。

## 2 应用实例

某大型装置由多个线圈组成,其中包括 TF 线圈(Toroidal Field,简称 TF)、CC 线圈(Correction Coils,简称 CC)、PF 线圈(Poloidal Field,简称 PF)和 CS 线圈(Central Solenoid,简称 CS)<sup>[4]</sup>,结构如图 3 所示。

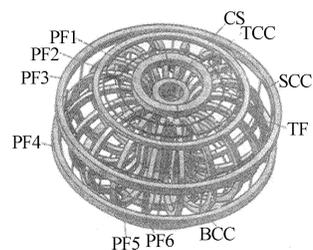


图 3 装置整体结构

图 3 中,校正场底部线圈(Bottom Correction Coils,简称 BCC)由内部超导绕组、中间绝缘层、外部线圈盒以及外部支撑 4 部分组成。其中,内部超导绕组采用超导纤维与具有良好柔韧性及强度的导电金属 Cu 绞制而成;中间绝缘层为 8 mm 厚,包绕整个内部超导绕组;而外部线圈盒包绕了整个内部超导绕组的绝缘层,置于线圈盒中;外部支撑的作用则是为了约束和定位线圈,保证线圈的位置,让线圈能够正常工作。Bottom 线圈整体结构如图 4 所示<sup>[5]</sup>。

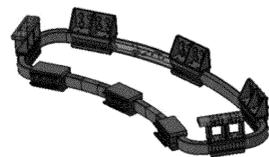


图 4 Bottom 线圈整体结构

在整个结构运行时,每个线圈在通电后产生磁场,受众多磁场及等离子体电流的共同影响,校正场磁体线圈在通电后产生洛伦兹力,为使校正场线圈符合设计要求,必须对线圈进行应力分析,保证线圈在最大场强时刻的有效性,使线圈结构能在最大场强时刻正常工作。故首先对线圈在最大场强时刻做磁场分析,然后再与结构分析进行

耦合。

## 2.1 磁场分析

无论是在间接耦合场分析还是在物理环境耦合场分析中,都要用到包含不同类型的几个结果文件类型。而当与电磁场进行耦合时,则需要得出电磁场分析结果文件(类型为 Jobname.rmg),本文用间接法对实例进行分析,先得出结果文件,为下一步与结构耦合做准备。

(1) 独立建模。首先利用 Ansys 按各结构的实际尺寸建立模型,由于整个装置结构众多,若对所有结构同时建立则计算过于复杂,为了提高分析效率,使分析更为简单化,不至于让求解的方程组规模过于庞大,故采用间接法进行耦合分析,在磁场和结构场中分别建立模型。由于 TF 线圈、CC 线圈、PF 线圈和 CS 线圈通电后相互影响,且装置本身属于完全的周期对称模型,故在磁场中只需建立 1/6 周期对称的线圈模型(不考虑支撑等非磁场因素),如图 5 所示。

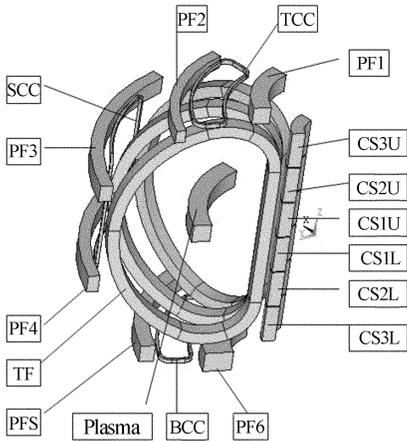


图 5 装置模型

而在与结构进行耦合时,由于是分析 BCC 线圈及支撑的受力情况,故不考虑螺栓, BCC 线圈的整体结构模型(加支撑结构)<sup>[6]</sup>如图 6 所示。只有考虑了以上因素而建立的模型,才不会对整个分析结果产生影响。

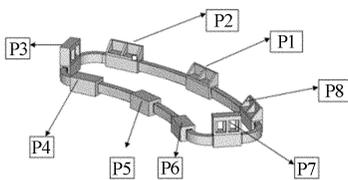


图 6 BCC 模型

(2) 分析计算。由于 TF 线圈、CC 线圈工作时电流为稳恒直流,因此对 Bottom 线圈上的

磁场分布有一定的影响,不随时间的变化而变化,而 PF 线圈、CS 线圈在保证等离子体的完整运行过程中,其上的工作电流会随着等离子体状态的变化而不断变化,故要分析各个线圈对 Bottom 线圈上分布的场强大小和方向的影响,通过场强矢量相互叠加计算,求出 Bottom 线圈各个时刻的最大场强,从而比较得到最大场强时刻,经过 Ansys 比较分析计算,得出在等离子体运行的一个完整过程中最大场强为 299 s 时刻,表 1 和表 2 所列为 299 s 时刻 PF 线圈、CS 线圈和等离子体上的总电流值。

表 1 PF 线圈电流值 kA

t/s	PF1	PF2	PF3	PF4	PF5	PF6
299	21.05	-34.40	-31.82	-26.49	-51.55	44.83

表 2 CS 线圈、等离子体电流值 kA

t/s	CS3U	CS2U	CS1	CS2L	CS3L	Plasma
299	-7.95	-25.14	-44.81	-29.99	6.09	16.95

由表 1 和表 2 所列电流大小,经分析得出电磁场分析结果文件 BCC-MAGNETIC-ANALYSIS.rmg<sup>[7]</sup>。299 s 时刻 Bottom 线圈磁场强度分布如图 7 所示。

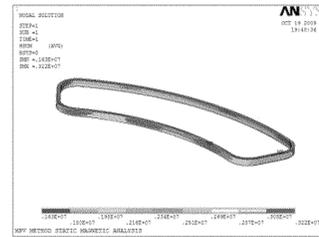


图 7 磁场强度分布图

## 2.2 与结构耦合

由于在电磁场分析中,已经得出分析结果文件 BCC-MAGNETIC-ANALYSIS.rmg,而为了更加方便地进行耦合分析,一般选择重新建立有限元模型。Bottom 线圈通过外部支撑连接在 TF 线圈上,而 TF 线圈工作时的变形会影响到 Bottom 线圈的受力,在磁场分析中,由于只考虑各线圈工作时 Bottom 线圈的最大场强时刻,没有考虑支撑部分的影响,所以在进行耦合分析时,重新建立模型,其中包括外部支撑部分,主要考虑电磁力和 TF 变形对 Bottom 线圈的综合影响。

(1) 超导绕组网格划分。在做耦合分析时,由于 Bottom 线圈中只有内部的超导绕组在工作

时通电流,所以电磁力只作用在内部的超导绕组上,为了计算的准确性,必须保证在耦合分析时,在结构场中的内部超导绕组网格划分的节点编号分布与点磁场分析时内部超导绕组网格划分的节点编号分布完全一致,即保持网格划分相同且标号一致。在磁场分析中,超导绕组网格采用了扫掠法划分,共形成 612 个单元及 1 088 个节点,故在与结构耦合时,超导绕组网格相应地也必须用扫掠法划分,单元及节点数目也应该一样且标号一致。

(2) 加载位移与电磁力。TF 变形通过支撑,影响到 Bottom 线圈的变形<sup>[8]</sup>,使 Bottom 线圈各个支撑产生位移,而 P3、P7 2 处支撑在 3 个方向上发生的位移极小,可忽略不计,各支撑点位移见表 3 所列。

表 3 支撑位移值 m

支撑	$U_x$	$U_y / 10^{-3}$	$U_z / 10^{-3}$
P1	0	- 3.00	2.00
P2	0	- 3.00	2.00
P3	0	0.00	0.00
P4	0	3.00	- 2.00
P5	0	3.00	- 2.00
P6	0	3.00	- 2.00
P7	0	0.00	0.00
P8	0	- 3.00	2.00

加载电磁力进行耦合时,由于电磁力也只有作用在内部的超导绕组上,所以必须先选取内部的超导绕组上的所有节点,然后导入电磁分析所得到的 Bottom 线圈内部超导绕组上的节点电磁力分布结果数据文件 BCC- MAGNETIC- ANALYSIS. rmg, 加载电磁力后线圈如图 8 所示。

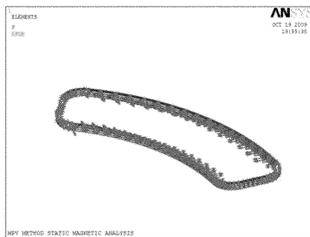


图 8 电磁力加载结果分布图

(3) 耦合分析结果。通过计算可得出 Bottom 线圈各部分在磁结构耦合场中的 VonMises 应力结果,如图 9 所示。

在图 9 中,图 9a 为超导绕组应力分布图;图 9b 为绝缘层应力分布图;图 9c 为线圈盒应力分

布图;图 9d 为整体结构应力分布图。由分析结果可知,超导绕组、绝缘层和线圈盒所受最大应力分别为 114.0、53.6、739.0 MPa,而图 9d 所显示的整体结构支撑部分受力均小于线圈盒,由此可知 Bottom 线圈结构所受最大应力在线圈盒上,为 739.0 MPa。

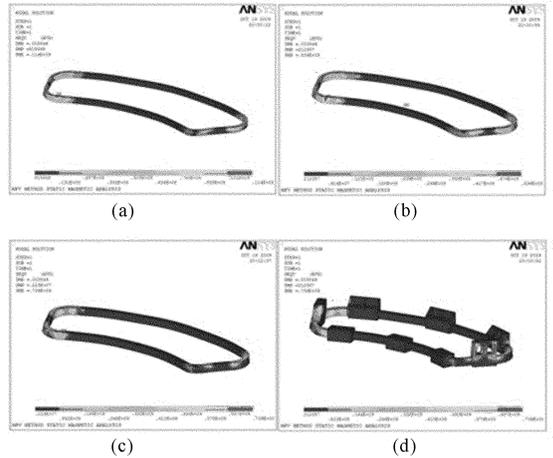


图 9 线圈各部分应力分布图

根据以上分析结果,为了提高 Bottom 线圈的强度,减小线圈承受的最大应力,由于最大应力出现在线圈盒上,因此可以考虑在不改变线圈内部结构的情况下,增加线圈盒的壁厚,来达到在相同的载荷条件下减小线圈盒的最大承受应力。线圈盒的初始厚度为 20 mm,随着线圈盒壁厚的增加,支撑的体积也会相应地增加,这样会消耗更多的材料而使成本增加,在装配时也会和装置内的其它结构产生干涉,故线圈盒壁厚不宜过大。因此根据实际情况,改进后的线圈盒壁厚为 35 mm,分析结果如图 10 所示。

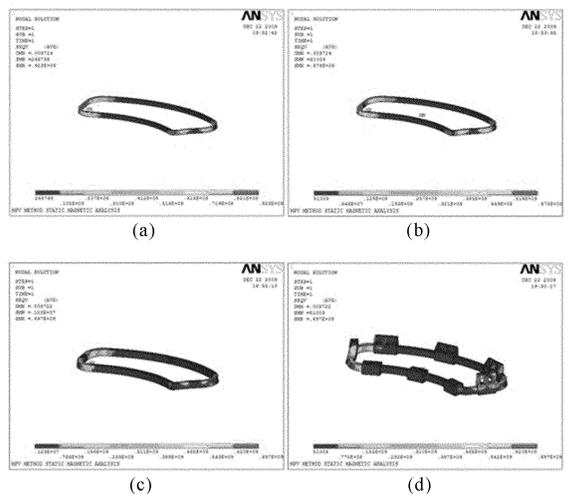


图 10 改进后线圈各部分应力分布图

(下转第 1760 页)

$$\left. \frac{1}{T} \int_0^T \ln S(v) dv \right\} \Phi(-d_1)。$$

分析可知:

(1) 对于定理 1 和定理 2, 当  $a=0, r(t)=r, u(t)=u, \alpha(t)=\alpha, K(t)=K, r, u, \alpha, K$  为固定常数, 就可得到固定利率及确定执行价格下基于几何布朗运动的亚式期权定价的公式。

(2) 股票价格过程在  $t$  时刻以瞬时红利利率  $q(t)$  支付红利时, 只需用  $S(t) \exp\{-\int_t^T q(s) ds\}$  代替定理中的  $S(t)$ , 即可得到有红利支付的期权定价公式。

### 3 结束语

本文选取了能反映股票预期收益率波动变化的指数 Omsteir Uhlenback 过程来刻画股票价格的变化规律, 利用等价鞅测度变换和随机分析, 在无风险利率依赖于时间函数的情况下, 研究了具有不确定执行价格的几何平均亚式期权的定价公式, 丰富了期权定价理论, 对提高证券公司的竞争力和风险管理水平具有重要的现实意义。

### [参 考 文 献]

- [1] Black F, Scholes M. The pricing of options and corporate liabilities [J]. Journal of Political Economy, 1973, 81: 133- 155.
- [2] Lamberton D, Lapeyre B. Introduction to stochastic calculus applied to finance [M]. New York: Chapman & Hall, 1996: 123- 128.
- [3] 林建华, 王福昌, 冯敬海. 股价波动的指数 O-U 过程[J]. 经济数学, 2000, 17(4): 29- 32.
- [4] 闫海峰, 刘三阳, 李文强. 股票价格遵循指数 O-U 过程的最大值期权定价[J]. 工程数学学报, 2004, 21(3): 297- 402.
- [5] 郑晓阳, 刘兆鹏. 基于 O-U 过程的具有不确定执行价格的期权定价[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(11): 31- 35.
- [6] 黄志远. 随机分析学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 133- 140.
- [7] 闫海峰, 刘三阳. 股票价格遵循 Omsteir Uhlenback 过程的期权定价[J]. 系统工程学报, 2003, 18(6): 547- 551.
- [8] 孙健全, 韩伯棠, 孙树垒. 基于指数 Omsteir Uhlenback 过程的权证定价[J]. 中国管理科学, 2006, 14(Z1): 255- 258.

(责任编辑 何晓雄)

(上接第 1736 页)

由图 10 可知, 改进后的超导绕组、绝缘层和线圈盒所受最大应力分别为 92.3、57.8、697.0 MPa, 比较改进前的分析结果, 可以判断出改进的方案是可行的。

### 3 结束语

本文简单介绍了耦合分析方法, 并对 BCC 线圈整体结构进行磁-结构耦合分析, 为 BCC 线圈的结构提供设计参考。而在应用间接法进行耦合分析时, 应该注意以下 3 点:

(1) 分开建模, 在做磁场分析时可以只建立与磁场相关的模型, 而在与结构耦合时, 再建立其它结构, 这样方便运算, 效率更高。

(2) 与结构耦合时, 网格划分要与磁场分析时通电部分的网格相对应, 保证节点编号分布完全一致。

(3) 加载电磁力时, 必须把磁场力加到相应的通电部分上, 才能正确导入磁场分析结果。

### [参 考 文 献]

- [1] 周宁. Ansys 机械工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 290- 293.
- [2] 阎照文. Ansys10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 429- 434.
- [3] 王永新. Ansys 软件中耦合场分析方法及应用[J]. 云南水利发电, 2006, 22(4): 32- 34.
- [4] 曾文彬, 吴维越. INTER 校正场线圈的结构分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(3): 264- 269.
- [5] 唐俊, 龙坤. CATIA V15 R14 中文版实例教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 19- 138.
- [6] 邓凡平. Ansys10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 68- 231.
- [7] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海蓉, 等. Ansys10.0 电磁学有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 193- 262.
- [8] 王建青, 武松涛, 宋云涛, 等. INTER 磁体馈线支撑结构的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(2): 67- 69.

(责任编辑 张秋娟)