

# 聚变堆包层信息模型建模与信息集成技术研究

汪太平<sup>1</sup>, 孙萍<sup>1</sup>, 王立涛<sup>1</sup>, 刘晓平<sup>2</sup>, 吴宜灿<sup>2</sup>

(1. 安徽工程科技学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**聚变包层的概念设计现已突破信息彼此孤立的传统方法,而是借助现代CAD技术创建集成信息模型并利用现代CAE技术对其全面系统地工程分析。依据从面向研究到面向工程的全过程统一的建模思想,分析了包层信息模型的信息组成;给出了包层信息模型的信息集成策略和包层几何模型建模策略;经过特征提取和抽象,采用BNF范式对包层几何模型进行了定义,并规范相关概念;由此在UG平台上创建了FDS包层的可变几何模型,并实现了信息的集成。

**关键词:**聚变堆;包层;信息模型;信息集成;特征;CAD

**中图分类号:**TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-4260(2005)02-0001-05

磁约束聚变系统由磁体系统、真空系统与包层、加料加热与驱动系统、排灰系统、辅助系统等子系统组成<sup>[1]</sup>。包层是其中关键部件之一,其主要作用是将14MeV聚变中子动能转化为热能、产氦、屏蔽核辐射、处理核废料等<sup>[2]</sup>。包层概念设计的内容包括功能确定、结构设计、材料选用、中子学分析、热工水力分析、结构分析、安装运行维护措施确定、经济分析等,这一过程迫切需要建立从面向研究到面向工程的全过程统一的包层集成信息模型BIIM(Blanket Integrated Information Model)<sup>[3]</sup>。

目前中科院等离子体物理研究所研发的大型多功能中子学程序Visual BUS和聚变-裂变混合堆评价核数据库HENDL(Hybrid Evaluated Nuclear Data Library),可以进行一系列的中子输运计算、燃料燃耗计算与燃料循环优化计算<sup>[4,5]</sup>;在聚变研究中发挥了巨大作用,随着研究深入,聚变包层的概念设计已经突破信息彼此孤立的传统方法,而借助现代CAD技术创建集成信息模型并利用现代CAE技术对其全面系统地工程分析,因而要求所建包层模型信息化、三维化、参数化、统一化、规范化,以使模型具有一致性和继承性;同时要求开发软件之间的公用接口以进行数据转换。

本文依据从面向研究到面向工程的全过程统一的建模思想,分析了包层信息模型的信息组成;给出了包层信息模型的信息集成策略和包层几何模型建模策略;经过特征提取,采用BNF范式对包层几何模型进行了定义并规范了相关概念;由此在UG平台上创建了FDS包层的可变几何模型并实现了信息的集成。

## 1 包层信息模型的定义与要求

包层信息模型是指能被计算机理解和处理且唯一描述包层的数字化表达形式,其信息表现包层的特征,是具有确定含义的一组数据,包括数据加工的结果。要求准确清晰地反映研究人员的设计思想,

- 收稿日期:2004-12-04
- 基金项目:安徽省教育厅自然科学基金项目(2003kj031)、国家自然科学基金(60273044)、中国科学院“百人计划”和知识创新工程项目、安徽省自然科学基金(01042201)
- 作者简介:汪太平(1962-),男,安徽桐城人,工程师,研究方向为CAD/CAE/CAM/核工程。

反映基本结构,满足从概念设计到工程设计全过程中各个阶段、各个环节对信息的需求,涵盖聚变领域知识和工程语义信息,并采用标准的描述方法和建模技术来实现,以便模型规范化,支持双向传送机制,以便各种设计活动并行工作,任何修改建议直接返回给各个设计活动。包层信息模型不仅要求处理设计系统的输入信息,还应处理设计过程的中间信息和结果信息,随设计过程的推进,信息逐渐丰富和完善。要求包层信息模型支持包层几何特性和物理特性计算、中子学分析、热工水力分析、结构分析等。包层信息模型建模主要涉及几何模型建模与信息集成问题,几何模型建模是其核心,建立统一的图形库和工程数据库是其基础。

包层集成信息模型建模系统 BIIMS(Blanket Integrated Information Modeling System)是聚变堆计算机辅助设计系统的重要组成部分,为包层设计提供集成信息模型,聚变堆包层信息模型的信息集成技术研究作为 BIIMS 系统的软硬件集成与开发的前导性研究具有重要意义。

## 2 包层信息模型的信息组成分析

包层信息模型支持包层的概念设计,应包含多学科知识,其信息从总体上分为两大类:几何信息和非几何信息。几何模型是非几何信息的载体,非几何信息作为几何模型的属性,被约束附加在几何模型上,为分析程序的处理产生可供输入的信息。非几何信息按其融入和组织方式及先后顺序可区分为通用非几何信息和包层 CAE 专用非几何信息。通用非几何信息由通用 CAD 软件在几何模型创建过程中产生,可从其内部数据库中直接提取;包层 CAE 专用非几何信息由 BIIMS 系统通过数据库管理系统从工程数据库中提取、转换、共享和重组,按包层 CAE 分析进程的需要被约束附加在几何模型上。

### 2.1 包层几何模型主要信息

包层几何模型主要信息包括包层功能原理、几何/拓扑、包层工艺技术、包层装配特征和数据管理等。1) 包层几何信息指构成包层的参数曲线、曲面和实体,属几何模型的基本信息,包括几何形状、尺寸大小、位置和方向,由三维 CAD 系统输入并可直接从其内部数据库中提取,例如环形磁场位形几何参数中的等离子体大半径  $R$  和小半径  $a$ 、等离子体 D 形截面拉长比  $\kappa$  和三角形变  $\delta$  等。

2) 包层拓扑信息指构成包层的零件实体的邻接关系,属几何模型基本信息,包括包层构件的层次结构关系、构件之间的几何装配约束关系等,如贴合、对齐、平行、垂直、相切、同心等。

3) 包层数据管理信息,属通用非几何信息,包括包层构件的名称、代号、材料、件数、技术规范 and 标准、技术要求、设计者、设计版本等。

4) 工程语义信息,包括包层功能原理、包层构件类型、构件聚类分组、构件装拆优先关系、运动约束、构件之间设计参数的约束和传递关系、包层制造技术、制造条件及工艺信息等。

5) 包层装配工艺信息,包括装配特征、装配顺序、装配路径、装配设备、装配工艺规划、装配过程仿真信息等。

### 2.2 包层 CAE 主要信息

包层 CAE 主要信息包括:1) 包层所用各类材料特性信息,材料包括氚增殖剂、冷却剂、结构材料和其他材料,如中子吸收剂与慢化剂、中子倍增剂、中子反射与屏蔽材料、待嬗变与已嬗变的裂变产物、待嬗变与已嬗变的可增殖裂变燃料、待嬗变与已嬗变的长寿命铜系核废料等。

2) 中子学分析信息,分为中子源参数和热源参数两类,包括等离子体对第一壁作用的物理参数、热能分布等输入参数,以及氚增殖率、能量倍增率、裂变燃料增殖率、结构材料活化率、辐射安全指标等输出参数。

3) 热工水力分析信息,包括流体特性参数(载热能力等)、流量、流速、进出口温度、温度分布、进出口压力、热功率、热转换效率等。

4) 结构分析信息,包括各类载荷(中子辐射载荷、热载荷和力载荷等)、各类应力应变等。5) 经济分析信息,包括材料成本、加工成本等。

包层信息模型是以上几个方面信息的有机集成。

### 3 包层信息模型建模策略

包层信息模型建模宜采用标准的描述方法和建模技术来实现, 为其规范化提供手段, 因而综合应用特征提取与特征设计方法、O—O 方法和“多视图”层次化组织方法。

#### 3.1 特征提取与特征设计

特征提取与特征设计方法充分利用现有高端 CAD 系统的特征化参数化建模功能, 直接利用其所提供的各种特征, 不足的部分通过用户自定义功能定义即特征设计, 在总结包层零件功能结构特点的基础上事先自定义若干基本特征, 建立特征库, 建模时以特征库内的基本特征类型为单元创建包层几何模型。

使用“特征集”定义包层信息模型, 在高层次上表达包层的功能原理信息和结构特征信息, 充分考虑形状、材料、加工技术、装配和成本核算等方面的特征, 提供完整的包层信息。

包层结构特征的提取, 决定包层几何模型的造型方法和信息的融入和组织方式, 为了顺利实现包层几何模型建模与信息集成, 采用了以下信息提取方法: 通过对聚变堆系统组成的分析, 获取了决定包层特性的聚变堆全局参数; 通过对世界上现有典型包层方案的分析与比较, 获取了包层的各种特征; 通过对包层概念设计的分析, 总结出其内容、方法和过程; 通过对包层概念设计所用软件的分析, 确定了其输入输出参数及其数据转换方式; 通过对包层信息模型建模系统的总体规划和建模系统平台的分析比较, 确定了建模系统的硬件和软件构架; 通过分析影响包层结构特征的因素及其与包层结构特征之间的关系, 对相应的结构特征进行了参数化定义; 根据包层结构特征构造特征库, 利用特征来描述包层构件的制造信息, 使其融入了丰富的工程语义信息和聚变领域知识。

#### 3.2 O—O 方法

包层信息模型建模基于 O—O 方法, 采用产品数据交换标准 STEP (Standard for the Exchange of Product model data) 中的形式化数据规范语言 EXPRESS 对包层数据进行一致性定义以实现各用户间协同设计, 并描述包层信息模型的动态特性, 使其呈现为开放式结构, 包层共有特性通过继承性显式表达, 因而模型在语义水平上易于维护; 通过封装性屏蔽细节, 支持模型的局部自治<sup>[6]</sup>。

#### 3.3 “多视图”层次化组织

包层信息模型采用“多视图”层次化组织方法。由于包层设计过程涉及众多领域, 而不同领域对信息需求不尽相同, 采用“多视图”方式组织集成信息模型作为源模型, 视图模型对应于各个具体应用领域。从源模型到视图模型并非简单的映射, 某些特有信息需经过交互输入。

### 4 包层几何模型建模策略

包层几何模型建模是包层信息模型建模的核心, 为了使 CAE/CAM 能够直接获取所需的信息, 包层构件的几何信息描述成为关键, 因此, 根据包层上各个特征的形状、尺寸和特征之间的几何关系构造包层构件模型, 首先应从总体上对各个特征加以详细分析, 决定各个特征的主要截面轮廓形状, 再按模型的集成性、易修改性和可维护性以及特征的模块化、简单化原则加以规划, 以决定这些特征的定义顺序。

包层几何模型建模采用双向混合造型方法, 首先基于分割的自顶向下地进行总体设计, 创建包层模型的外部特征, 然后将总体原则全相关地贯穿于所有的子装配或零件中, 从而自底向上地创建包层内部特征。

自顶向下的设计首先申明装配模型整体及各个子装配和零件的空间位置关系和大小, 设定全局性的关键参数, 从而建立起部件的包封, 然后再建立详细的子装配或零件模型来替换相应的包封。全局参数将被子装配和零件自动引用, 并在设计中逐步得到确定。当全局参数被更改时, 有关子装配或零件也将随之改变。

这种方法有利于协同设计, 因总体方案确定后, 所有设计人员都可同时展开工作。

## 5 包层几何模型定义

包层几何模型反映包层基本结构,经过特征提取和抽象,用 BNF(Backus Norm Form)对包层模型进行抽象描述。

$\langle \text{包层几何模型} \rangle ::= \{ \langle \text{功能包层几何模型} \rangle \langle \text{屏蔽包层几何模型} \rangle \}$ ;  $\langle \text{功能包层几何模型} \rangle ::= \{ \langle \text{环壳} \rangle | \langle \text{段圈} \rangle | \langle \text{内筒} \rangle \langle \text{外筒} \rangle | \langle \text{内瓣} \rangle \langle \text{外瓣} \rangle | \langle \text{内管阵} \rangle \langle \text{外管阵} \rangle | \langle \text{内块} \rangle \langle \text{外块} \rangle \}$ ;

$\langle \text{屏蔽包层几何模型} \rangle ::= \{ \langle \text{屏蔽环壳} \rangle | \langle \text{屏蔽内筒} \rangle \langle \text{屏蔽外筒} \rangle | \langle \text{屏蔽内瓣} \rangle \langle \text{屏蔽外瓣} \rangle | \langle \text{屏蔽内管阵} \rangle \langle \text{屏蔽外管阵} \rangle \}$ ;

$\langle \text{环壳} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{段圈} \rangle \} | \langle \text{内筒} \rangle \langle \text{外筒} \rangle \}^{[7]}$ ,  $\langle \text{屏蔽环壳} \rangle ::= \{ \langle \text{屏蔽内筒} \rangle \langle \text{屏蔽外筒} \rangle \}$ ;

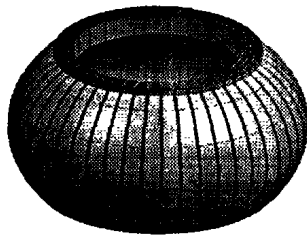


图1 环壳



图2 段圈

A. 采用环向等分法时:等分数  $n=2, \dots, 64$ ; B. 采用柱面二分法时:将包层分为内包层和外包层。两种方法顺序不同,所得结果不同:

1) 先 A 后 B 时,结果为:先得到段圈,后得到内瓣和外瓣  $\text{out}: \langle \text{段圈} \rangle ::= \{ \langle \text{内瓣} \rangle \langle \text{外瓣} \rangle \}$ ;

2) 先 B 后 A 时,结果为:先得到内筒和外筒,后得到内瓣和外瓣:  $\langle \text{外筒} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{外瓣} \rangle \} \}$ ,  $n=2, \dots, 64$ , 见图 1;

$\langle \text{内筒} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{内瓣} \rangle \} \}$ ,  $n_1=2, \dots, 64, n_1 \leq n$ ;  $\langle \text{屏蔽外筒} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{屏蔽外瓣} \rangle \}_2^m \}$ ,  $m=2, \dots, 64, m \leq n$ ;  $\langle \text{屏蔽内筒} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{屏蔽内瓣} \rangle \}_2^{m_1} \}$ ,  $m_1 < n_1$ ;  $\langle \text{外瓣} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{外块} \rangle \} | \langle \text{外管阵} \rangle \}$ ,  $i=1, 2, \dots, 16$ , 见图 2;  $\langle \text{内瓣} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{内块} \rangle \} | \langle \text{内管阵} \rangle \}$ ,  $j=1, 2, \dots, 16$ ;

$\langle \text{内块} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{内球床} \rangle \}_k^1 \}$ ,  $k_1=1, 2, \dots, 10$ 。

$\langle \text{外块} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{外球床} \rangle \}_k^1 \}$ ,  $k=1, 2, \dots, 10$ ;

因此,内包层指:内筒或内瓣或内块;外包层指外筒或外瓣或外块。以上定义了包层模型的外部特征,下面就包层的内部特征作进一步定义,包层内部特征可归结为球床和管,与“块”和“管阵”相对应。

对于各种管无论是 G 管、W 管、LM 管、B 球管、MA 管<sup>[7]</sup>,只是在后期分析应用中需要区别其所附加的信息不同,其口径尺寸和位置有量的差别,但其几何形状基本相同。不同管之间质的区别在于管轴线方向是沿极向、环向还是径向。

$\langle \text{内管阵} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{内径向隔板} \rangle \}^p \{ \langle \text{内环向隔板} \rangle \}^q \}$ ,  $p=0, 1, \dots, 10, q=0, 1, \dots, 10$ ;

$\langle \text{外管阵} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{外径向隔板} \rangle \}_2^{p_1} \{ \langle \text{外环向隔板} \rangle \}_2^{q_1} \}$ ,  $p_1=0, 1, \dots, 10; q_1=0, 1, \dots, 10$ 。

对于各种球床无论是 B 球床、FU 球床、还是 FP 球床<sup>[7]</sup>,只是在后期分析应用中需要区别其所附加的信息不同,冷却板之间的距离有量的差别,但其几何形状无本质区别。

$\langle \text{内球床} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{内冷却板} \rangle \}^u \}$ ,  $u=2, 3, \dots, 10$ ;

$\langle \text{外球床} \rangle ::= \{ \{ \langle \text{外冷却板} \rangle \}_2^v \}$ ,  $v=2, 3, \dots, 10$ 。

## 6 结束语

根据包层几何模型建模策略和包层几何模型定义,目前借助 UG NX 创建了 FDS(Fusion-Driven Subcritical System)包层<sup>[4]</sup>的可变几何模型,并利用 UG/Qpen APIF 二次开发功能将本文分析的包层

CAE 主要信息与包层几何模型进行了集成, 再通过中科院等离子体物理研究所自主研发的工具软件 MCAM(MCNP Automatic Modeling)将信息模型转换成 MCNP 输入文件进行了中子学分析。

#### [参考文献]

- [1] 汪太平. 聚变堆包层集成信息模型建模研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [2] 吴宜灿. 高放废物在聚变—裂变混合堆中转化的研究[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 1992.
- [3] 汪太平, 刘晓平, 吴宜灿等. 聚变工程研究中的统一建模与信息集成[J]. 安徽工程科技学院学报. 2004. 19(2): 41—44.
- [4] 吴宜灿, 柯严, 汪太平, 等. 聚变驱动次临界堆概念设计研究[J]. 核科学与工程. 2004, 24(1): 72—80.
- [5] 中国实验混合堆详细概念设计[R]. ASIPP and SWIP, April, 1996.
- [6] 童秉枢, 等. 现代 CAD 技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [7] 汪太平, 刘晓平, 吴宜灿. 包层编码分类计数及其命名方法研究[C]. 计算机技术与应用进展[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 2004. 8: 1164—1168.

## Research on Technology of Blanket Info—modeling and Info—integrating of Fusion Reactor

WANG Tai-ping<sup>1</sup>, SUN ping<sup>1</sup>, Wang Li-tao<sup>1</sup>, LIU Xiao-ping<sup>2</sup>, WU Yi-can<sup>2</sup>

(1. Anhui Engineering Science and Technology College, 241000 Wuhu, China;

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

**Abstract:** In conceptual design of fusion blanket, we have got rid of traditional methods, in which a kind of information is isolated from others, but apply modern CAD technology to create the integrated information models, and apply modern CAE technology to analyze all the same models for different engineering. The info—composition of blanket info—model is analyzed, based on an idea, by which blanket model is unified in the whole procedure from research—oriented to engineering—oriented. A method of blanket info—modeling is established. After extracting and abstracting blanket features, the geometric model is defined by Backus Normal Form and associative concepts are normalized. Thereby, blanket variable geometric model of Fusion—Driven Subcritical System is created, and all kind of information is integrated with the geometric model, under the platform of Unigraphics NX.

**Key words:** fusion reactor; blanket; information model; information integration; feature; CAD