

聚变包层结构特征分析及其实现方法研究

汪太平¹, 王仲珏¹, 刘晓平², 吴宜灿²

(1. 安徽工程科技学院 机械工程系, 安徽 芜湖 241000; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230003)

摘要:建立包层信息模型是聚变反应堆包层研究发展的需要,而包层几何模型建模是其基础,三维参数化特征化CAD系统都要求在创建产品数据模型之前对产品进行结构特征分析和参数化描述,在分析影响包层结构特征的因素基础上,给出了主要影响因素与包层结构特征之间的关系,对相应的结构特征进行了定义和参数化描述,并指出了各种结构特征在特征造型系统中的实现方法。

关键词:聚变;包层;结构特征;几何模型;参数化

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

包层几何模型建模采用三维参数化特征化建模方法,在高层次上表达包层功能原理信息和结构形状信息,充分考虑形状、材料、加工技术和信息管理等方面的特征,以建立一个从面向研究到面向工程的全过程统一的包层信息模型^[1],基于特征的几何造型是其基础,几何模型是信息的载体,因此,包层结构特征分析与提取至关重要。

尤其重要的是中子学分析程序MCNP对几何模型提出了严格的要求:相邻实体必须严格共面、共顶点,不允许出现任何缝隙和干涉,即使是CAD系统容差级的也不允许;不允许出现样条等高次曲线曲面,只能使用一次和二次曲线曲面,等等。采用本文介绍的基于分割和约束的自顶向下的全局设计方法,可以从根本上解决缝隙与干涉难题。

1 影响包层结构特征的主要因素

对于托克马克(Tokamak)型磁约束聚变装置而言,影响包层结构特征的因素有:电磁物理及磁场位形;磁流体动力学;等离子体边界;环径比;偏滤器;纵场线圈;真空系统;加工、装配和维护可行性;各种窗口;包层功能;热流分布及流体的流向、流量;冷却剂的输入输出;加料卸料方式;材料及其工作状态;机械强度等。以下针对其中几个主要影响因素与包层结构特征的关系进行讨论。

2 磁场位形与包层结构特征

实现聚变反应的条件非常苛刻,磁场必须稳定地约束带电粒子,产生的等离子体电流必须稳定,磁力线必须闭合,而约束位形的磁力线一般为空间曲线,所以磁场必须采用环形,且具有很好的绝热性。因而包层具有环形特征。约束等离子体的另一个条件是磁力线必须旋转变换。其实现方法是简单环形装置加角向磁场合成为螺旋扭曲的磁场。其特点是磁力线既沿环向转动又沿极向转动,一根磁力线绕 z 轴一周后不闭合,而绕 z 轴无限周后形成一个环形磁面。由磁力线形成的轮胎形的密闭磁面叫磁笼^[2]。但等离子体内部无磁力线。因而包层不能破坏磁笼,其材料必须透磁,其整体结构具有环形壳体特征。

为保证等离子体纯度,包层和偏滤器的第一壁FW(First Wall)总表面积应最小化,进而应在FW或其基体处形成密闭的真空容器。

为提高等离子体参数(如比压 β 等),降低成本提高经济性,特意将等离子体p-r(poloidal-radial)截面

收稿日期:2005-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60273044);中国科学院“百人计划”和知识创新工程资助项目;安徽省自然科学基金资助项目(01042201);安徽省教育厅科研基金资助项目(2003kj031)

作者简介:汪太平(1962—),男,安徽桐城人,工程师,硕士。

形状沿 z 轴拉长并产生三角变形从而形成 D 形,这样可以在不增加大半径的条件下,增加等离子体的体积,提高角向磁场,并且便于设置偏滤器.因而包层具有 D 形截面特征.

综合起来,电磁物理及磁场位形所决定的包层和偏滤器整体的结构特征为 D 形截面环形壳体^[3],如图 1,其内部为等离子体环(plasma torus),其外有磁场线圈.

2.1 D 形截面特征的参数化描述及其在特征造型系统中的实现方法

等离子体环的 p - r 截面 D 形边界轮廓曲线可用表达式近似表示为^[4]: $x = R + a\cos(\theta + \delta\sin\theta)$, $z = \kappa a\sin\theta$, $0 \leq \theta \leq 2\pi$,其中, R 为大半径, a 为小半径, κ 为拉长比, δ 为三角形变,极角 θ 为自变量.

在 Unigraphics NX 中,曲线表达式应表示为: $x = R + a\cos(360t + 180\delta\sin(360t))$, $z = \kappa a\sin(360t)$, $0 \leq t \leq 2\pi$, t 为 UG 内部参数.

包层环壳 FW 表面 p - r 截面轮廓线的形状也为 D 形,但应由等离子体的 D 形边界轮廓曲线向外偏移刮削层厚度 SOL(Scrape-off Layer)得到,其偏距 SOL 沿极向变化规律目前尚未确定.若为等距,则可由 [Offset]命令产生;若将曲线表达式中的 a 替换为 $a + \text{SOL}$,则 SOL 非均匀如图 2.

但是,仅根据等离子体边界曲线的近似表达式不能确定偏滤器 FW 的截面轮廓曲线,若采用极向磁通等值线方法,则不仅能设计出包层和偏滤器 FW 的截面轮廓曲线,而且符合工程实际.

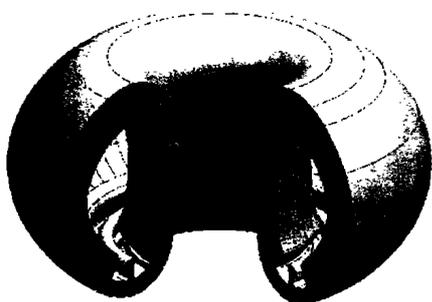


图 1 D 形截面环壳特征

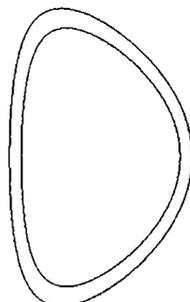


图 2 不均匀 SOL

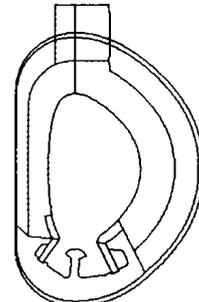


图 3 D 形截面区域分割

2.2 由极向磁通等值线求 FW 的截面轮廓曲线方法

由 TSC(Tokamak Simulation Code)程序确定的极向磁通分布 (X, Z, Ψ) ,其输出数据为 *.dat 文件,将其输入 CAD 支撑软件 UG 中使其生成点阵,再经处理,形成极向磁通等值线 COX(Contour map of poloidal magnetic iso-flux).根据极向磁通等值线可以确定 FW 的 p - r 截面轮廓线及其位置,包括: R 、 a 、 κ 、 δ 、 x 点、包层 FW 和偏滤器 FW 的 p - r 截面轮廓线及位置等,但还需补充一些约束条件,例如:刮削层厚度 SOL(100~300 mm);FW 的 p - r 截面轮廓线与极向磁通等值线的重合度高,即要求两者在同一点的切线夹角最小;偏滤器翼板与进入偏滤器的最后一条极向磁通等值线的最小距离(100 mm);靶板与极向磁通等值线的夹角应能满足:有效地将 α 粒子折射进入抽气管道,而靶板本身不吸收过多的热,也就是使 α 粒子动能损失最小等.目前 COX 程序正在开发中.

2.3 D 形截面草图创建方法

为了保证模型的参数化和相关性,在建模过程中必须自始至终地完全避免失去参数化和相关性的操作和建模方法,如 [Divide]和 [Quick Trim]命令的使用等,因此由表达式形成的 FW 轮廓曲线不能直接用于草图,而是把它作为基准转化为参考线,将草图轮廓曲线约束于它.

堆芯 D 形截面被划分为 11 大区域:极向场线圈、环向场线圈、内屏蔽层、外屏蔽层、内包层、外包层、内导流板、外导流板、内靶板、外靶板、偏滤器,见图 3.其 D 形截面草图的创建采用了基于分割和约束的自顶向下的全局设计方法,使堆芯系统 11 大区域一体化全相关设计并修改关联,为堆芯并行工程和协同设计奠定了基础.

2.4 环形壳体创建方法

分区域逐个创建部件,并分别创建成组特征(Group Features),通过阵列成组特征或阵列装配便形成

环形壳体. 其中每个部件都通过选择草图中的相应单连通区域封闭曲线经旋转或拉伸形成实体, 再经并交差运算生成各部件的基构件, 再按需要设计其内部零件, 经装配生成部件的子装配.

3 环径比与包层结构特征

环径比 $A = R/a$ 决定堆芯的类型和包层类型. 低环径比堆芯如球形环和紧凑环, 其导体柱与等离子体之间没有纵场线圈, 仅有保护导体柱的屏蔽包层, 内屏蔽包层厚度为 t_{insh} , 表现为低环径比特征, 如图 4; 高环径比时, 内包层厚度 t_{inb} 随 A 值变化, A 值小时, t_{inb} 小, A 值大时, t_{inb} 大, 直至 $t_{inb} = t_{outb}$ (外包层厚度), $t_{inb} \neq t_{outb}$ 时, 内包层上、下两端过渡段不等厚.

内包层厚度 t_{inb} 为间接变量, 取决于 R 、中心螺线管半径 a 、屏蔽包层厚度 t_{insh} 、纵场线圈径向厚度等, 在 D 形截面草图中以表达式施加尺寸约束. 包层等厚特征区域可用 [Offset] 命令产生外轮廓线.

4 偏滤器与包层结构特征

磁场位形有单零点 SN(Single Null)位形和双零点 DN(Double Null)位形两大类^[5], 与之相应, 排灰系统有单零偏滤器和双零偏滤器两类结构. 由此决定了包层也有单零结构特征(如图 1)和双零结构特征(如图 5).

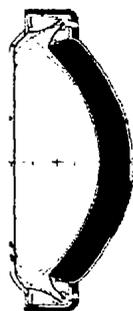


图 4 低环径比特征

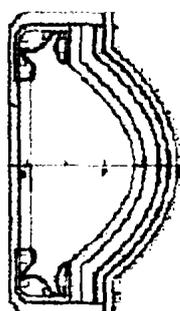


图 5 双零结构特征

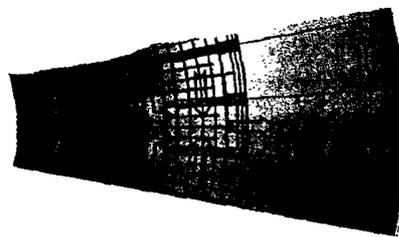


图 6 管道收集示意图

在 D 形截面内, 偏滤器位于下 x 点以下(和上 x 点以上), 与包层的分割线应在极向磁通等值线图中确定, 确定时应考虑以下因素: x 点的位置坐标、偏滤器入口相对 x 点的位置和偏滤器入口宽度、内外包层下端与偏滤器的配合定位及固定特征等. x 点位置坐标从 TSC 程序输出的 *.dat 文件中读入, 由 UG 自定义功能判别并提取, 参数定义分单零结构和双零结构两类情况: 单零结构为 (x_{xpoint}, z_{xpoint}) ; 双零结构为 $(x_{upxpoint}, z_{upxpoint})$ 、 $(x_{lowxpoint}, z_{lowxpoint})$. 偏滤器入口相对 x 点的位置及偏滤器入口宽度用两个参数描述: 内导流板距 x 点的最小距离; 外导流板距 x 点的最小距离. 在草图中施加相应的尺寸约束.

5 纵场线圈与包层结构特征

5.1 包层环形壳体分割方法

对于磁约束聚变反应堆, 由于纵场线圈是 D 形封闭的, 并要套装在包层外, 所以对包层环形壳体必须沿环向分割, 分割方法有两种:

(1) 简单环向等分法. 以 z 轴为中心辐射状 n 等分包层和偏滤器, 形成 n 个 D 形段圈, 相应的结构特征定义为段圈(sector), 其等分角为 $360/n$, 这种方法, 内包层环向尺寸比外包层小得多, 内包层拼缝过多, 不能满足拼缝应最少化的原则.

(2) 区别等分法. 首先将 D 形截面环形壳体分割为内筒、外筒^[5]和偏滤器, 再分别沿环向 n_1 等分、 n_2 等分和 n_3 等分. 等分数应为纵场线圈数的整数倍, 外包层的最佳倍数为 3. 在满足制造装配可行性的前提下等分数越少越好, 而纵场线圈数少时磁场波纹度大, 不利于约束等离子体, 但也不宜过多, 应给各种窗口的设置留出空间, 限定 $1 < n_i \leq 128$. 例如: FDS(Fusion Driven Subcritical System)^[7]的纵场线圈数为 16, 内

包层等分数为 32,外包层和偏滤器等分数都为 48.

5.2 分割方法的实现

在 D 形截面内创建一内外包层分割直线过 FW 截面轮廓线的最高点且与 z 轴平行,最高点由分割直线与 z 轴之间的距离尺寸 $R + (a + \text{SOL}) \cos(90 + \text{delta} 180/p, ())$ 约束控制;等分通过旋转 [revolve] 命令实现,首先选取草图中相应区域的截面曲线,再选择旋转轴 z,然后输入相应的旋转角 $360/n_i$,装配时选用环形阵列即可.

与纵场线圈处于同一环段的外包层瓣和偏滤器都无窗口(port)特征,目前世界上所有的包层研究都是针对这一段进行的,而偏滤器研究是针对两纵场线圈之间的有抽气窗口特征的段进行的,实际上应该对一个完整的单元和一些特殊部位都进行研究.

6 真空系统与包层结构特征

真空系统一般包括三套:等离子体室真空系统、内冷屏真空系统和外冷屏真空系统.等离子体的纯净度要求等离子体室必须密闭,因此所有包层段圈必须无缝拼装;内冷屏与外屏蔽包层一体化设计,并处于功能包层与纵场线圈之间,隔绝功能包层的高温与纵场线圈的超导低温,并且起到支撑功能包层的作用,因此功能包层外部具有安装支撑结构特征;外冷屏真空系统隔绝超导磁体的低温与环境室温,功能包层的所有进出管道都穿过内冷屏和外冷屏,功能包层的所有窗口都穿过内冷屏而与外冷屏直接相联.

7 各种窗口与包层结构特征

为了安装维护、等离子体加料加热、检测诊断和控制等,在两个纵场线圈之间的外包层瓣上必须开设窗口,窗口使外包层瓣沿极向分成上、中、下三段.

(1)上段.上段的顶端具有各种管道的收集口(upper port)结构特征,其管道收集示意如图 6(图中箭头不表示流向,仅表示管道布局,可能流进,也可能流出,也可能既有流进又有流出),其中包括上段本身的各种母管、内包层瓣的各种母管以及两侧无窗口特征外包层瓣的各种母管.各种母管包括冷却剂和氦增值剂进出口母管.

(2)中段.中段为窗口(equatorial port),不具有功能包层,但具有特殊结构的屏蔽包层.

(3)下段.下段的底端具有各种管道的收集口(lower port)结构特征,与 upper port 不同,lower port 中包括下段本身的各种母管、两侧无窗口外包层瓣的各种母管以及偏滤器的冷却剂母管和抽气管道,因为与纵场线圈处于同一环段的偏滤器的各种管道都只能从两纵场线圈之间的偏滤器窗口中通过.

极向分段特征在 D 形截面中通过设置分割线即可实现,各窗口特征在细化设计过程中实现.

8 包层功能与包层结构特征

包层功能包括:能量转换,将 14 MeV 聚变中子动能转化为热能,同时吸收中子、慢化中子;热能输出,将热能从包层输出堆外,同时排出堆芯中大量集热以冷却系统;生产氦,建立氦燃料循环;反射未被吸收的中子,屏蔽核辐射;处理核废料(包括长寿命裂变产物和锕系元素等高放核废料),生产裂变燃料,以建立铀钍燃料循环体系,同时倍增中子^[7].它们决定的包层内部结构特征共有 49 种,而基本特征只有 8 种:G 管、W 管、LM 管、B 球管、B 球床、MA 管、FU 球床和 FP 球床^[8].对于某种特定的包层仅具有其中某几种基本特征.为了提高包层空间利用率和换热效率,包层本体设计仅采用方管而其外部采用圆管^[4].

管道排列组合方式有套装成为同轴管(双壁管)、轴线沿环向、径向或极向并列成为管排、若干管排并列成为管阵;管端连接方式有串联或并联,W 管或 G 管在布设时,应考虑温度的均匀性要求,相邻两流道的流向应相反,因此管端应相间并联.LM 管在布设时,应考虑 MHD 效应.

结构特征的模型实现方法原则上应与实物的加工方法一致,聚变堆中普遍使用 HIP(Hot Isostatic Pressing)技术,具有大量流道的冷却板和 U 形第一壁采用 Half 式 HIP 热合法加工;各种管阵采用型板拼装 HIP 热合拼缝法加工;各种球床采用冷却板与 U 形第一壁拼装 HIP 热合拼缝法加工.仿此,首先建立零件模型,然后装配即可.

9 结束语

目前通过 FDS 包层可变几何模型的建模与信息集成方法的研究,完成了包层结构特征提取及其参数化定义;在 UG 平台上,采用基于分割和约束的自顶向下的全局设计方法,成功实现了 FDS 包层可变几何模型建模,实现了堆芯系统 11 大区域一体化全相关设计,使堆芯所有部件修改关联,为堆芯并行工程和协同设计奠定了基础;利用 UG/OPEN API 开发工具和 VC++ 编程语言编制了包层模型修改程序,实现了包层模型的自动修改。

参考文献:

- [1] 汪太平,吴宜灿,刘晓平,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.
- [2] 石秉仁,磁约束聚变原理与实践[M]. 北京:原子能出版社,1999.
- [3] 汪太平,刘晓平,吴宜灿,等. 聚变反应堆包层信息模型建模研究[A]. 全国第 15 届计算机科学与技术应用学术会议论文集[C]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003. 303-308.
- [4] B. B. Kadomtsev. Tokamak Plasma: A Complex Physical System[M]. IOP Publishing Ltd. 1992. 63.
- [5] 中国实验混合堆详细概念设计[R]. ASIPP and SWIP,1996.
- [6] 吴宜灿,柯严,汪太平. 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.
- [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[A]. 2004 全国计算机科学与技术应用进展[C]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2004. 1164-1168.
- [8] 吴宜灿. 高放废物在聚变-裂变混合堆中转化的研究博士学位论文[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理研究所,1992.

Fusion blanket structure features analysis and modeling methods research

WANG Tai-ping¹, WANG Zhong-jue¹, LIU Xiao-ping², WU Yi-can²

(1. Dept. of Mech. Engn., Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China;

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

Abstract: It is indispensable that the blanket information model should be created based on blanket geometric modeling for engineering design and analysis of fusion blanket. Structural features should be extracted from products and described in parameters before modeling with a parametric featured 3D CAD system. Constraints of the blanket structural features are analyzed and the main constraints are determined. These structural features are defined in parameters. Some methods are established, by which these structural features are created under a CAD system with feature modeling.

Key words: fusion; blanket; structural feature; geometric model; parameterize