



·蒙特卡罗方法及其应用·

中国聚变工程试验堆 360°全堆建模与初步核分析

伍秋染^{1,2}, 杜 华^{1,2}, 郑 俞^{1,2}, 卢 棚^{1,3}, 刘松林¹

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;
3. 合肥综合性国家科学中心 能源研究院(安徽省能源实验室), 合肥 230026)

摘 要: 基于自动化建模软件平台 cosVMPT 的发展, 建立了包含厂房结构的 360°全堆模型, 主要结构包括中心螺线管线圈、真空室、纵场线圈、极向场线圈、内外冷屏、杜瓦, 以及精细结构的水冷包层和偏滤器。空间布置上包括 16 个上/下窗口和 6 个中窗口, 2 个斜窗口作为 NBI 束通道, 其余窗口内设为屏蔽块。引入“on-the-fly”(OTF)全局减方差方法以获得可靠的中子、光子通量, 结果显示其在厂房内的分布不对称。验证了 cosVMPT 平台和 OTF 方法的可靠性, 并与扇段模型所获得的结果进行对比, 进一步确认能够通过扇段模型来简化建模计算过程的使用范围。

关键词: CFETR; 360°全堆模型; cosVMPT; OTF 方法; 中子学

中图分类号: TL61; TL64

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210364

Neutronics modeling of 360° China Fusion Engineering Test Reactor and preliminary nuclear analysis

Wu Qiuran^{1,2}, Du Hua^{1,2}, Zheng Yu^{1,2}, Lu Peng^{1,3}, Liu Songlin¹

(1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Institute of Energy, Hefei Comprehensive National Science Center (Anhui Energy Laboratory, Hefei 230026, China)

Abstract: With the support of the modelling conversion platform cosVMPT, the 360° model is needed to solve this inaccuracy from asymmetry. The detailed structure of all main components for China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) has been developed. The whole model consists of Central Solenoid (CS), Vacuum Vessel (VV), Port (16 upper/lower ports, 6 equatorial ports in which 2 oblique are ones used for NBI beam channel), Thermal Shielding (VVTS & CTS), Toroidal and Poloidal Field Coils (TFC & PFC), Cryostat and the House Building. The water-cooled ceramic breeder (WCCB) blanket and water cooled divertor with full detailed structure is inserted, while spare ports are filled with shielding material. The preliminary calculation has been performed by MCNP code combining with the advanced “on-the-fly” GVR method, which was introduced to generate the global weight window to accelerate the neutron transport, and the reliable neutron and photon flux map was obtained. This work realizes the application of cosVMPT platform and OTF method in complicated fusion reactor, and it validates their robustness. In addition, the results of 360° model has been compared to that of sector model, to verify the validity and applicability of using sector model to simplify the modelling and calculation.

Key words: CFETR; 360° model; cosVMPT; on-the-fly method; neutronics

聚变堆的辐照场分析对于装置的设计以及工作人员和环境的辐射防护等起到至关重要的作用。目前,对聚变堆的核分析主要基于边界为反射面的扇段模型。然而由于中国聚变工程试验堆(CFETR)的设计在环向上不是完全对称结构,尤其是在窗口处会存在辅助系统的引入带来的中子流孔道,造成中子泄露,因此反射面不能完全准确地反映粒子的输运。CFETR 360°全堆的高保真中子学建模与核分析对于整个聚变堆的核安全评估和各个部件的设计优化都具有重要的指导性意义。2020 年,ITER 已经针对 ITER E-lite 模型进行 360°精细中子学建模与计算,获

* 收稿日期:2021-08-24; 修订日期:2021-12-17

基金项目:国家磁约束聚变能专项(2019YFE03110000, 2019YFE03110002); 国家自然科学基金青年项目(12005145)

联系方式:伍秋染, qiuran.wu@ipp.ac.cn。

通信作者:卢 棚, peng.lu@ipp.ac.cn。

得了全堆主机部分的中子通量分布,计算结果表明,窗口区域的中子通量在环向上分布不对称^[1]。当前 CFETR 各系统部件的设计都进入工程设计阶段,根据设计,中性束注入的通道为 2 个斜窗口,各个辅助加热系统、诊断系统等也将由窗口引入,这些都会导致中子通量分布的不对称^[2]。聚变堆的部件往往在空间范围内延伸广,有些还需人工维护或遥操等手段,因此需要对重要部件进行核分析,以评估其辐照损伤和所处环境的辐照剂量,为设计优化以及人员安全提供数据支持。同时,为简化中子学建模与计算,以往对于聚变堆的计算都是基于扇段模型加反射面的设置,本文对 360°全堆模型进行计算,并将结果与扇段模型对比,以确认扇段模型结果的正确性及其适用范围。

1 CFETR 几何模型

CFETR 模型在空间上主要分为堆心主机和堆外厂房两个部分,以生物屏蔽层作为间隔。如图 1(a)所示,本次计算所使用的模型包含两套中性束注入(NBI)系统。图 1(b)为 CFETR 主机的主要部件,包括中心螺线管线圈(CS)、真空室(VV)、内冷屏(VVTS)、纵场线圈(TFC)、极向场线圈(PFC)、外冷屏(CTS)、杜瓦(Cryostat),以及含精细结构的包层(BLK)和偏滤器(DIV)。模型在环向上基本是对称的,因此往往使用扇段模型(图 1(b)所示扇段)进行计算,并将扇段边界设为反射面以实现重复的周期性边界,但从几何结构可以看出,由于 NBI 的波束通道,模型在窗口处是不对称的,则此时反射面不能正确反应粒子的真实信息,需要通过建立完整模型来解决不对称结构带来的结果不准确性,并与扇段模型的计算结果进行对比。

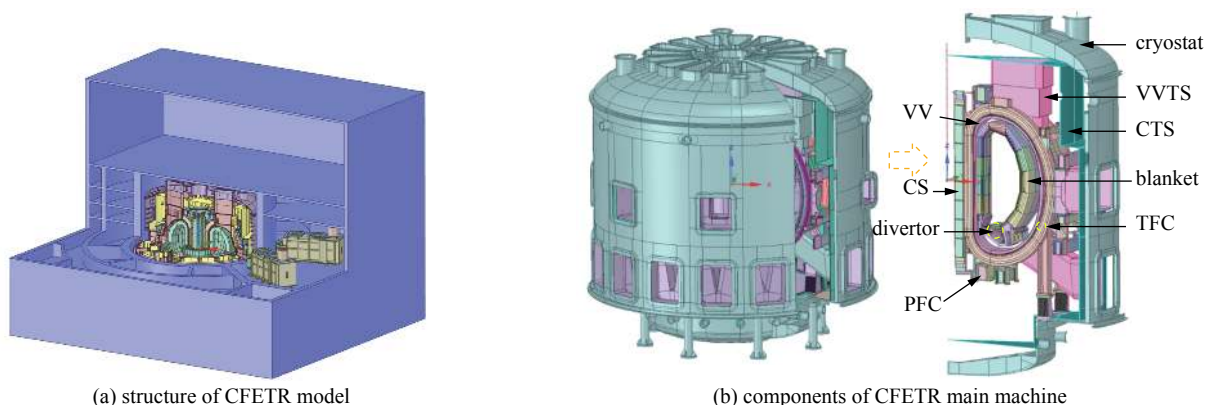


Fig. 1 Model of CFETR geometry

图 1 CFETR 几何模型

2 计算工具与模型

2.1 模型转换

本次中子学模型的建立主要通过对 CAD 模型进行分组,并对复杂模型建立边界盒体,实现分步建模^[3-4]。建模具体流程如图 2 所示。首先对 CAD 模型进行预处理,并按照不同部件、部件中不同材料进行分组;再分别对主机和厂房进行转换。转换主机前,先建立 1 个包裹主机的盒体作为最外边界,再对包层、偏滤器等细化结构的部件,以及窗口等将来会被用于填充其他部件的区域建立简单盒体;将主机的其他简单或永久部件与建立的盒体一起进行转换,再单独转换盒体内部件,使用 FILL 卡加 TR 卡的方式填充盒体,或使用自定义空腔的功能(转换平台特有功能,空腔边界形状可由用户指定,能完全替换盒体,避免丢粒子或 FILL 卡使用不便的情况)替换盒体。最后将厂房及其内部部件和包裹主机的盒体一起转换,再将盒体替换为上一步获得的主体模型,获得最终计算所使用的中子学模型。

如图 3 所示,模型预处理主要包括 4 个部分:(1)删除建模细节和细小部件:倒角、螺栓等结构对工程设计十分重要,但对中子学计算,尤其是对于全场的通量分布获取几乎没有影响,且给中子学建模带来一定难度,因此对其进行简化删除;(2)样条面处理:在 CAD 建模时,常常通过曲线在空间中位移生成曲面,这些曲面被称为样条面,不能被 MCNP 和转换程序所识别,因此需要对其进行重建,替换为可以用简单解析式表示的平面和曲面;(3)材料均匀化处理:针对一些含有复杂流道等结构的部件,如图 3(c)中内冷屏的冷却管道,在无需计算与其自身细节相关的物理量时,将其简化成以冷却管管径为厚度的板,材料设为以真空、冷却管和冷却剂的体积比为比例的均匀化材料;(4)模型切割:转换软件在转换模型时,会自动对模型的实体进行切割,但为避免自动切割产生不规则的或

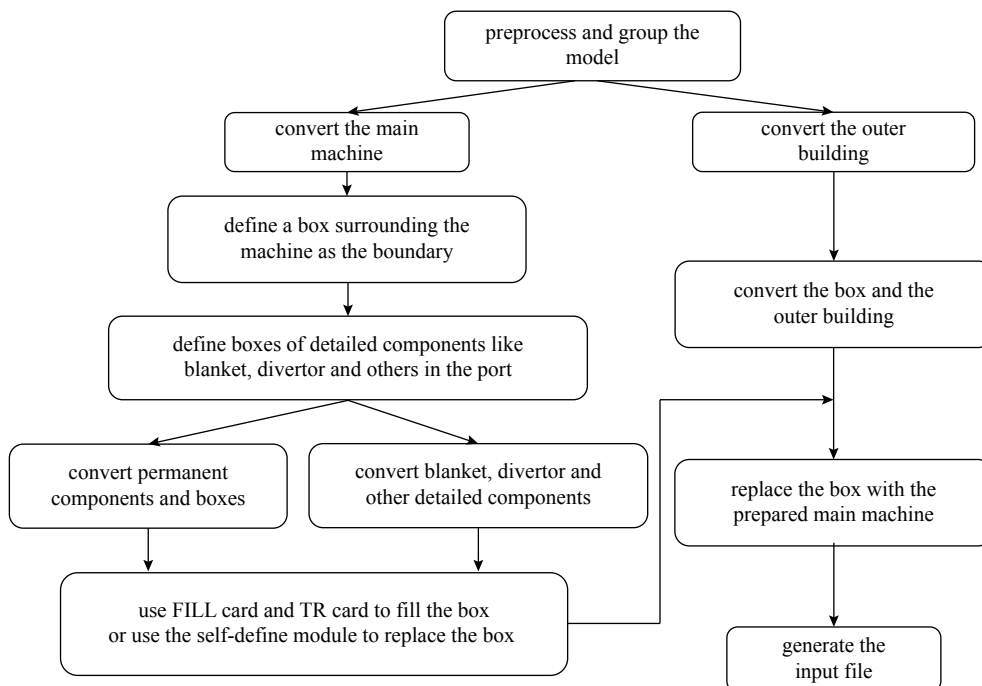


Fig. 2 Process of modelling

图 2 建模流程

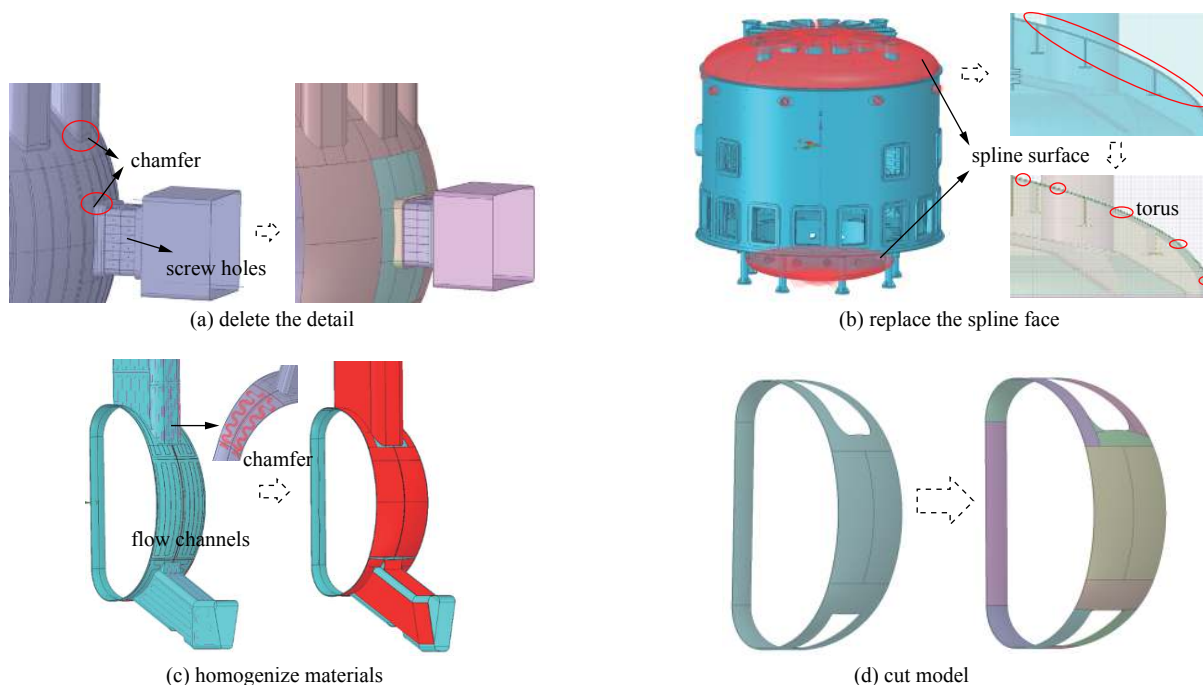


Fig. 3 Pre-processing of modelling

图 3 模型预处理

过小的实体,同时为了便于后期对模型进行修改与维护,在模型转换前先手动按经验和需求将模型切为简单规则体。

2.2 中子学模型

CAD 模型到中子学模型的转换由 cosVMPT^[5] 进行。cosVMPT 是一个由国家电投、中国科学院等离子体研究所和合肥工业大学联合开发的可视化自动建模平台,当前支持 cosRMC 和 MCNP 两种输入文件的生成,转换模型时的主要功能包括部件分组,材料属性的添加,U 卡、FILL 卡的设置以及 2.1 节中自定义空腔的功能。整个全堆模型的转换时间主要消耗在 CFETR 主机主体部分,图 4 为转换 CFETR 主机部件时平台的界面,转换时长约为 170 min。

图 5 为转换并完成各输出文件的合并后,最终的中子学模型 MCNP 截面图,整个模型的主体部分(不包括包

层、偏滤器等细化结构)约有 21 800 个栅元, 36 300 个曲面, 2440 个空腔。从图中可以看出, 模型与图 1 所示的几何模型相符合, 且通过了中子学丢粒子运输的检查。

同时, 为进一步验证几何无误, 统计并对比了模型的 MCNP 计算体积与 CAD 真实体积^[3,5]。图 6 为主机主体部分、偏滤器和包层模型在转换前后的体积相对偏差, 其中转换前 CAD 模型的体积由软件测量获得, 转换后中子学模型的体积由 MCNP 计算获得, 根据计算结果可以看出两者的体积相对偏差在±2% 以内。结合体积偏差和 MCNP 截面绘图的查看, 可以证明模型转换的正确性。

2.3 粒子运输

本次计算使用 MCNP5 作为蒙特卡罗粒子输运程序, 核数据库选用 FENDL-2.1 库。整个中子学模型的尺寸为 93 m×83 m×69.9 m, 其中除 NBI 通道外, 是典型的厚屏蔽深穿透问题; 此外, 整个模型几何较为复杂, 且含有大量中子流孔道, 这些给计算结果的收敛带来很大挑战。计算采用网格计数, 受内存设置的限制, 网格尺寸在聚变堆主机部分约为 40 cm, 生物屏蔽层外约为 65 cm, 中子光子均分为两群计数, 共计约 1000 万个网格。

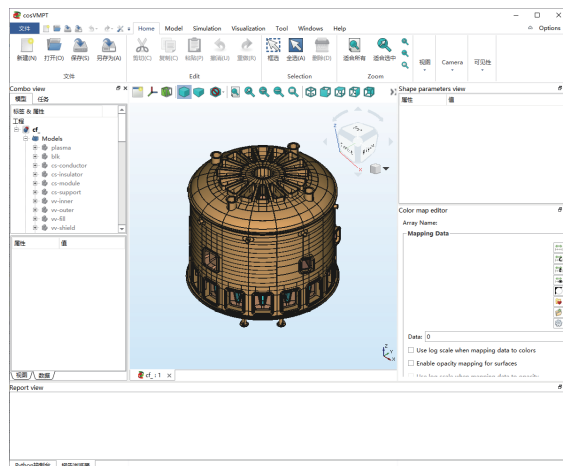


Fig. 4 Platform of cosVMPT

图 4 cosVMPT 平台界面

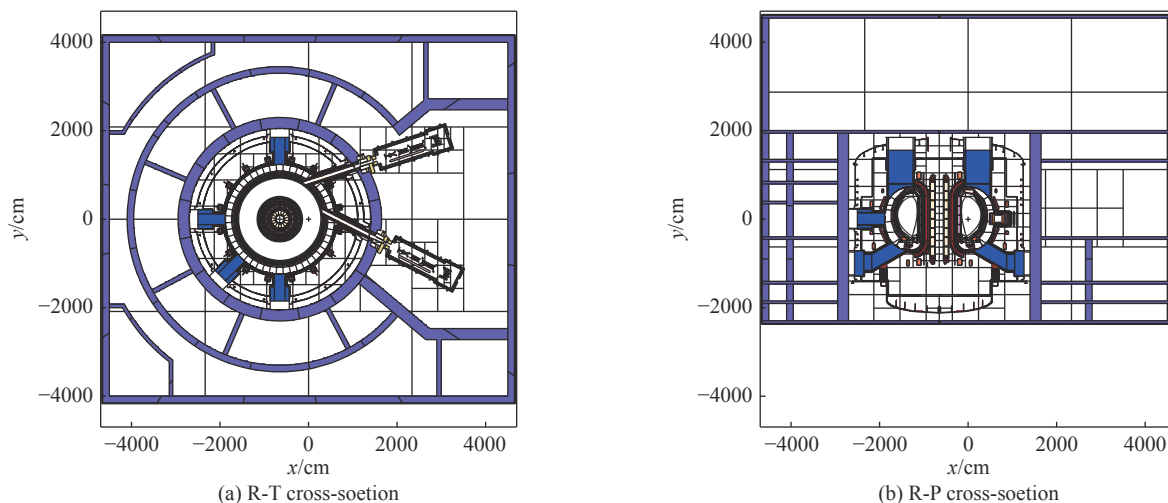


Fig. 5 Neutronics model of 360° CFETR

图 5 CFETR 360°全堆中子学模型

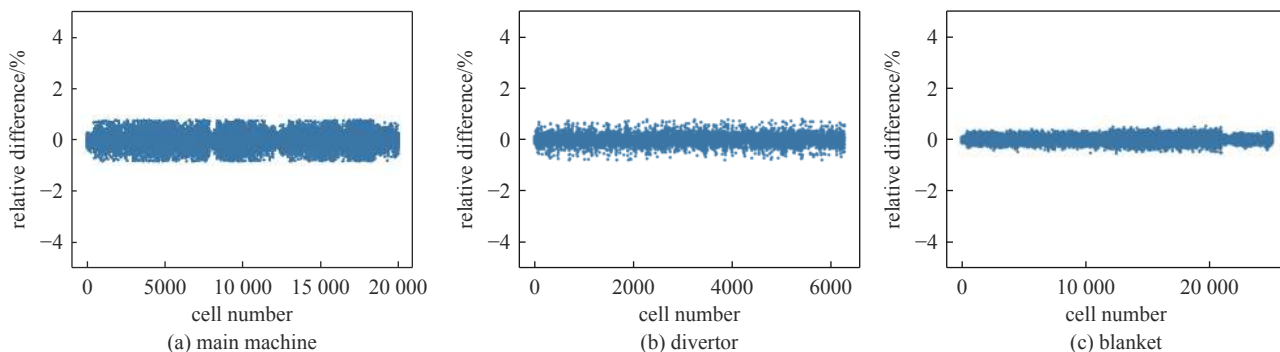


Fig. 6 Relative difference between volume of CAD model and neutronics model

图 6 原始 CAD 模型与中子学模型体积相对偏差

因此, 为在合理的计算时间内获得可接受误差的计算结果, 引入“on the fly”GVR 全局减方差方法(OTF 方法)^[6-7]。OTF 方法包括权窗产生和屏蔽计算两个步骤, 二者可自动化衔接。该方法通过迭代获得计数网格的中子、光子通量信息, 迭代更新网格权窗文件, 以加速粒子运输; 同时通过粒子流出控制法动态抬高权窗上限, 从而有效地控制

长历史问题。

3 结果与分析

为获得误差合理的通量分布,整个 MCNP 的粒子输运使用 600 核,共计 42 h,其中,权窗产生时长为 10 h。同时,为评估扇段模型+反射面设置的简化方式是否合理可行,将全堆模型获得的计算结果与扇段模型的计算结果进行对比,计算的主要物理量为中子通量、光子通量^[4,8]和氦增值比(TBR)。

计算所用的聚变功率为 1.5 GW。根据氘氘反应释放的能量,聚变中子产生率为 $5.332 \times 10^{20} \text{ s}^{-1}$,中子源的能量抽样遵循聚变高斯能谱,以 14 MeV 为平均能量,位置的抽样概率遵循等离子体区域不同位置中子发射率的分布。

3.1 中子、光子通量

计算通过网格计数的方式,获得全局的中子、光子通量分布。表 1 列出了 CFETR 主要部件所在位置的通量值及其统计误差,部件包括包层、偏滤器、真空室、中心螺线管线圈、极向场线圈、纵场线圈、杜瓦以及生物屏蔽层(最内侧和最外侧),表中第 2 列给出的坐标为该部件所处网格的中心点位置。

表 1 主要部件的中子/光子通量及误差

Table 1 Neutron/photon flux of main components and their relative error

component	position (x, y, z)/cm	neutron flux/ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	neutron flux relative error/%	photon flux/ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	photon flux relative error/%
blanket	(980.0, -14.5, 15.0)	$3.19\text{E}+14$	0.15	$1.19\text{E}+14$	0.28
divertor	(580.0, -14.5, -465.0)	$1.75\text{E}+14$	0.16	$7.80\text{E}+13$	0.28
vacuum vessel	(1 220.0, -14.5, 15.0)	$3.65\text{E}+12$	0.54	$1.91\text{E}+12$	0.63
center solenoid coil	(140.0, -14.5, 15.0)	$9.58\text{E}+03$	9.28	$1.19\text{E}+04$	4.01
poloidal field coil	(1 500.0, -14.5, 295.0)	$4.28\text{E}+08$	6.67	$1.85\text{E}+08$	9.10
toroidal field coil	(1 340.0, 219.5, 15.0)	$3.92\text{E}+08$	2.75	$1.16\text{E}+08$	3.03
cryostat	(1 860.0, -14.5, 15.0)	$1.95\text{E}+08$	1.35	$5.30\text{E}+07$	3.44
bio-shielding (in)	(2 100.0, -14.5, 15.0)	$3.11\text{E}+05$	6.66	$3.55\text{E}+05$	7.46
bio-shielding (out)	(5 217.5, -14.5, 15.0)	$1.28\text{E}+05$	7.43	$2.64\text{E}+05$	3.26

从表 1 可以看出,各部件的通量水平与其所在位置相对应,即越远离等离子体源区,其通量值越低,且各部件的统计误差均在可接受的范围内。

图 7 为 CFETR 主机部分的三维中子通量分布图,中子通量由等离子体区域沿径向逐渐衰减,中子将沿 NBI 通道泄露,其中最大值位于包层和偏滤器等靠近等离子体的区域,经真空室后降低约 3~4 个量级,到中心螺线管区降低约 7 个量级。

图 8 为径环向截面(R-T 截面)以及径极向截面(R-P 截面)的中子、光子通量及误差分布,可以看出,在聚变堆主机部分,统计误差基本满足低于 5%,厂房区域的误差在 10%~25%,由于目前仅对全堆进行初步的通量场计算分析,误差已可以接受,且通过计算时间的增长,还可以进一步减小误差。

根据通量分布图可以看出,由于中窗口的 2 个 NBI 通道,等离子体区产生的中子经由斜窗口处泄露较多,沿通道有明显的中子流,且导致堆外厂房区域的通量分布在环向上不对称,尤其是在 NBI 厂房两侧的空间内中子、光子的通量高于其他厂房区域。

3.2 与扇段模型对比

为评估扇段模型加反射面设置的适用性,对不同空间尺度上的核响应数据进行了全堆模型与扇段模型的结果

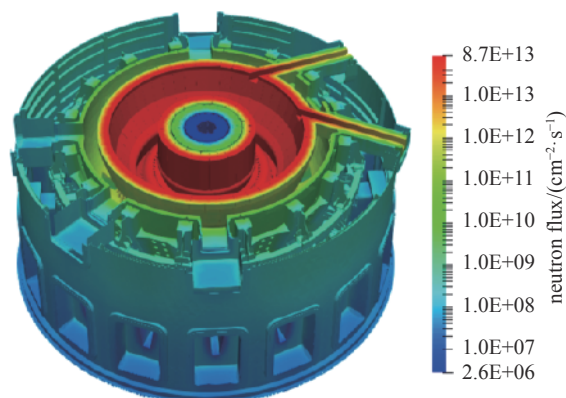


Fig. 7 Neutron flux distribution for 3D CFETR main machine

图 7 CFETR 主机三维中子通量分布

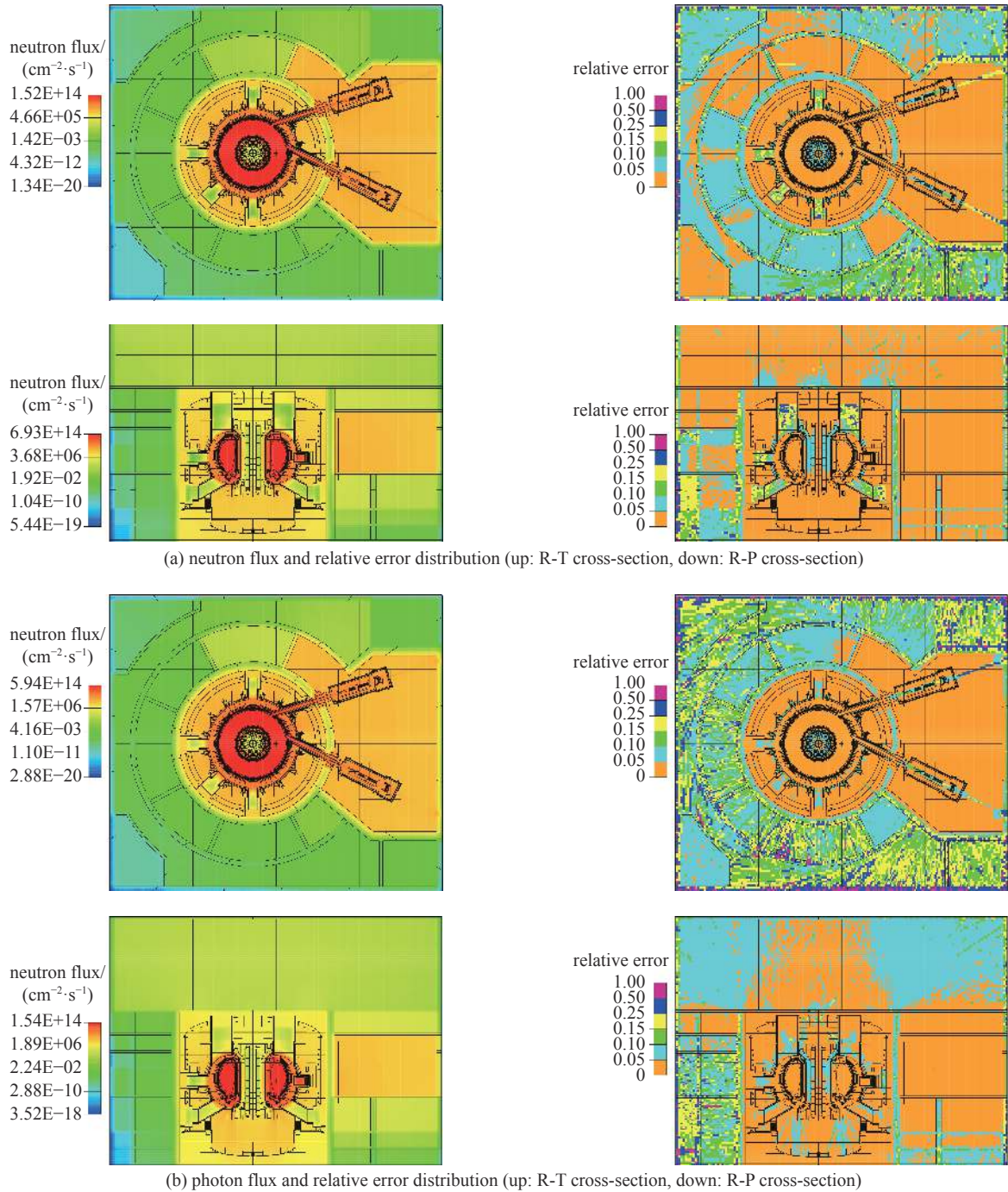


Fig. 8 Neutron/photon flux and relative error distribution

图 8 中子、光子通量及误差分布

对比。图 9 为 112.5° 含 2 套 NBI 系统的扇段模型的中子通量分布，与图 8(a) 中的全堆模型中子通量分布进行对比可以看出，尽管已经是 5 个扇段的模型 (22.5°/扇段)，在 NBI 厂房的两侧，中子通量的分布仍是不对称的，因此不能通过反射面正确地获得粒子分布信息。但在 NBI 厂房的对侧，一定的环向范围内，各厂房的中子通量分布是对称的，因此可以通过扇段模型加设置反射面的方式简化建模与计算。

此外，同时对比了引入辅助系统后全堆的 TBR^[9-11]。在使用全堆模型计算时，通过对包层的包围盒进行处理，删除天线前端或波束通道所占据的区域，并将包层部分的天线部件填入后进行计算统计；在使用扇段模型计算时，针对每一种辅助加热系统，建立其独立的扇段模型 (22.5°/112.5°) 分别进行计算，最后将各扇段结果按模型角度的占比相加获得最终的 TBR。计算结果表明，两种方式所得的 TBR 相对误差不超过 0.2%。因此对于 TBR 等涉及的空间范围距离中子源区较近的物理量，可以通过扇段模型+反射面的方式来简化建模与计算。

4 结 论

本文使用 cosVMPT 建模平台,通过分步建模的方式建立了 CFETR 包含厂房及 NBI 结构的 360°全堆中子学模型,在引入“on-the-fly”GVR 全局减方差方法后,有效地加速了粒子运输,并控制长历史过程的发生。实现了 cosVMPT 和 OTF 方法在大规模聚变堆模型上的应用,验证了程序与方法的健壮性。初步在合理的计算时间内获得了可接受误差程度的全堆中子、光子通量场分布,计算结果符合聚变堆几何结构的布局,在斜窗口 NBI 的通道处中子泄露导致通量升高,且导致周围环境内通量分布的环向不对称。最终通过与扇段模型+设置反射面方式的计算结果进行对比,评估了全堆模型的非对称结构对通量分布的影响,验证了扇段模型结果的正确性及其适用范围。结果表明,在长距离范围内,非对称结构及其两侧的计算需要建立完整模型;但当统计的物理量在距离中子源区较近的范围内,未到非对称结构区域时(如 TBR),两者的计算误差很小,可以通过扇段模型简化建模与计算。

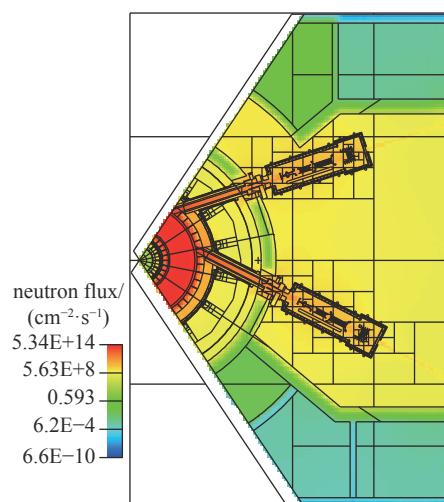


Fig. 9 Neutron flux distribution for 112.5° model with 2 sets of NBI systems

图 9 含 NBI 系统的 112.5° CFETR 中子通量分布

参考文献:

- [1] Juarez R, Pedroche G, Loughlin M J, et al. A full and heterogeneous model of the ITER tokamak for comprehensive nuclear analyses[J]. *Nature Energy*, 2021, 6(2): 150-157.
- [2] Zhuang Ge, Li Guoqiang, Li Jiangang, et al. Progress of the CFETR design[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 112010.
- [3] Du Hua, Wu Qiuran, Lu Peng, et al. Development of cosVMPT and application of creating 3D neutronics model for 360-degree CFETR[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2021, 40: 2.
- [4] 杜华. 面向MC的辅助建模技术发展与应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 83-87. (Du Hua. Research on the development and application of computer-aided modeling technology for MC codes[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 83-87)
- [5] Du Hua, Luo Yuetong, Han Chengcun, et al. Development of an assistant program for CAD-to-cosRMC modelling[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2020, 157: 111662.
- [6] Zheng Yu, Qiu Yuefeng, Lu Peng, et al. An improved on-the-fly global variance reduction technique by automatically updating weight window values for Monte Carlo shielding calculation[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2019, 147: 111238.
- [7] Zheng Yu, Qiu Yuefeng, Lu Peng, et al. Verification of the on-the-fly global variance reduction technique on Monte Carlo global coupled neutron photon shielding calculations[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 171: 112565.
- [8] 郑俞. 蒙特卡罗减方差加速方法研究与应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 70-73. (Zheng Yu. Research and application of Monte Carlo variance reduction method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 70-73)
- [9] Wu Qiuran, Lu Peng, Zheng Yu, et al. Neutronic analyses of upper port ECRH antenna system for CFETR[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 162: 112078.
- [10] 伍秋染, 卢棚, 郑俞, 等. CFETR离子回旋加热天线中子学分析[J]. *核技术*, 2020, 43: 110603. (Wu Qiuran, Lu Peng, Zheng Yu, et al. Neutronic analyses of ICRF antenna system for CFETR[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, 43: 110603)
- [11] 刘松林. Task 12 CFETR辐射场分析[R]. 黄山: CFETR集成工程设计年会暨聚变堆设计研讨会, 2019. (Liu Songlin. Task 12 The analyses for radiation field of CFETR[R]. Huangshan: Annual Conference of CFETR Integrated Engineering Design and the Seminar of Fusion Reactor Design, 2019)